

Jukka Karjalainen

Jäykän taka-akselin tuennan muutoksen mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

6.5.2018

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Jukka Karjalainen Jäykän taka-akselin muutoksen mitoitus 35 sivua + 5 liitettä 6.5.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Lehtori Pasi Oikarinen
Tämän opinnäytetyön tavoitteena on mitoittaa jäykän taka-akselin tuennan muutos nelilinkkityypiksi. Kyseessä on Volkswagenin valmistaman ensimmäisen korimallin Caddy-mallinen avolava-auto, jossa on jäykkä taka-akseli ja tuentana toimivat lehtijouset. Tarkoituksena on parantaa ajoneuvon ajo ominaisuuksia ja samalla mahdollistaa taka-akselin geometrioiden säädettävyys. Työssä esitellään taka-akselin tuennan variaatioita ja niiden ominaisuuksia sekä perehdytään akselin anti-geometrian käsitteisiin ja tarkastellaan painopisteen ja kallistuskeskiön sijaintia. Lisäksi lasketaan tuentaan kohdistuvia voimia, ja tuennan komponenteilta vaadittavia lujuuksia. Lopputuloksena on taka-akselin 4-linkkituenta, jota voidaan säätää tarpeen mukaan monipuolisesti eri ajotilanteisiin, kuitenkin ajoneuvon käytettävyyden kärsimättä.	
Avainsanat	Caddy, nelilinkkituenta

Author(s) Title	Jukka Karjalainen Sizing a Suspension Type Change for a Rigid Rear Axle
Number of Pages Date	35 pages + 5 appendices 6 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
The purpose of this thesis was to size a change of suspension type of a rigid rear axle to a 4-link type. The vehicle in question is a Volkswagen manufactured mk1 model Caddy pick-up, which has a rigid rear axle and leaf springs act as the support arms. The aim was to improve vehicle's handling characteristics, and at the same time, make it possible to adjust the anti-geometry of the rear axle. First the thesis describes different types of 4-link support and their properties. After that, the concepts of anti-geometry are explained, and the locations of the instant center and center of gravity are examined. Then Forces directed to the support links and the strengths of the support are calculated. As a result, a 4-link support system is built. It can be adjusted in multiple ways for different driving situations, without losing the vehicle's practicality. The front axle is not covered in this thesis, because the vehicle has an identical front axle that Mk1 Volkswagen Golf has. There are a large amount of aftermarket parts available for modifying the front axle of this vehicle.	
Keywords	Caddy, 4-link,

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Jäykän taka-akselin tuenta	2
2.1	Pyörän asentokulmat	2
2.2	Akselintuentatyypit	2
2.2.1	Jäykkä palkki akseli	2
2.2.2	Taipuisa palkkiakseli	3
2.2.3	Lehtijousin tuettu taka-akseli	4
2.2.4	Monilinkkituenta	4
2.3	Akselin vapausasteet	5
2.4	Akselin poikittaistuenta	5
2.5	Tuennan valinta ja tyyppi	6
3	Ajodynamiikka	7
3.1	Katsantoperspektiivit	7
3.1.1	Yläkatsantoperspektiivi	8
3.1.2	Etukatsantoperspektiivi	8
3.1.3	Sivukatsantoperspektiivi	9
3.2	Massakeskipiste	9
3.3	Massakeskipisteen sijainti	9
3.3.1	Pituussuuntainen paikka	10
3.4	Korkeus	11
3.5	Kallistuskeskiö	12
3.6	Hetkellinen nopeusnapa	13
3.7	Antigeometriat	14
3.7.1	Anti-dive	14
3.7.2	Anti-rise	15
3.7.3	Anti-lift	15
3.7.4	Anti-squat	15
4	Alustaan kohdistuvat voimat	16
4.1	Sivuttainen kuorma	17

4.2	Pitkittäiskuorma	18
5	Lujuuslaskenta	21
5.1	Perusaine	22
5.2	Pultit ja mutterit	22
5.3	Pitkittäistuennan materiaalit ja mitoitus	23
5.4	Poikittaistuennan materiaalit	25
5.5	Hitsit	25
6	Tuentageometrian suunnittelu	28
6.1	Alkuperäinen tuenta	29
6.2	Uusi tuenta	30
7	Yhteenveto	32
	Lähteet	34
	Liitteet	
	Liite 1. Chassis Master -ohjelma	
	Liite 2. 4-link Wizardin alkumäärittäminen	
	Liite 3. Hetkellisten nopeusnapojen mahdolliset sijainnit	
	Liite 4. Hetkellisen nopeusnavan sijaintilistaus	
	Liite 5. Nelilinkin liikkuvuus	

Lyhenteet

IC Instant center, hetkellinen nopeusnapa.

CG Center of gravity, massakeskipiste.

RC Roll center, kallistuskeskiö.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on käsitellä taka-akselin tuennan muutosta. Muutoksen kohteena on Volkswagenin valmistama mk1 Caddy -mallinen avolava-auto. Kyseisessä autossa on jäykkä taka-akseli, joka on tuettu lehtijousilla ja heilahduksenvaimentimilla. Heilahduksenvaimentimet ja jouset ovat on rajattu työn ulkopuolelle.

Muutoksella pyritään parantamaan ajoneuvon ajo-ominaisuuksia ja käytöstä. Toimivan ratkaisun löytämiseksi ja muutosten vaikutusten ymmärtämiseksi tässä opinnäytetyössä käsitellään tarpeellisella tasolla asiaan liittyvää terminologiaa ja käsitteitä.

Tarkoituksena on mitoittaa kyseessä olevan ajoneuvon taka-akselin tuennan muutos lehtijousituennasta nelilinkkituennaksi. Jäykän akselin tuentageometrian suunnittelu perustuu tuennan kallistusakselin ja sivukatsannon hetkellisen nopeusnavan määrittämiseen.

Kallistuskeskiön ja massakeskipisteen sijainnit on määritettävä, että voidaan käsitellä taka-akselin tuennan kallistusakselia ja hetkellistä nopeusnapaa, jotka ovat suunnittelun perustana. Pyöräntuennan geometrioiden ymmärtämisen myötä siirrytään alustan komponentteihin vaikuttavien voimien laskentaan. Jotta ratkaisusta saadaan toimiva ja turvallinen käyttää, on laskettava, millaisia voimia alustan komponentteihin kohdistuu. Kun voimat tunnetaan, voidaan lujuuslaskennan avulla määrittää, millaisia komponentteja voidaan käyttää.

Lopuksi tarkastellaan akselin kinematiikkaa, voiko akseli tällaisella kokoonpanolla liikkua halutulla tavalla.

Etuakselia ei työssä juurikaan käsitellä, koska ajoneuvossa on täysin samanlainen etuakselisto kuin Mk1 Volkswagen Golfissa ja tähän ajoneuvoon on saatavilla valtavasti erilaisia etuakselin muutoksiin valmistettuja osia.

2 Jäykän taka-akselin tuenta

2.1 Pyörän asentokulmat

Pyörien asentokulmat ovat erittäin tärkeitä ajodynamiikan kannalta, koska pienikin muutos vaikuttaa ajokäyttäytymiseen. Muutoksen kohteena oleva akseli ei ole vetävä, eikä alkuperäisessä konstruktiossa ole mahdollista säätää pyörien asentokulmia, joten en niitä tässä työssä käsittele tämän enempää. Käytännössä takapyörät ovat suorassa pitkittäis- ja pystyakseleihinsa nähden, joten auras- ja camber-kulmat ovat 0°.

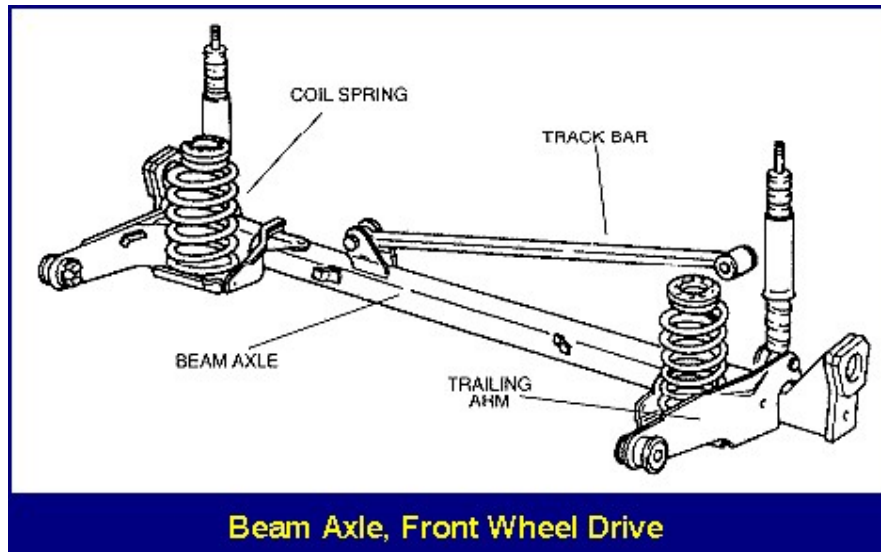
2.2 Akselintuentatyypit

Etuvetoisten ajoneuvojen taka-akselilla käytetään useita erilaisia tuentatapoja. Ne voidaan jakaa karkeasti kahteen päätyyppiin: erillisjousitettuihin ja jäykkiin akseleihin. Erillisjousitetut akselit ovat tuettu nimensä mukaisesti erillisin tuki varsin ajoneuvon kantavaan rakenteeseen. Tästä johtuen erillistuenta tapoja on lukemattomia erilaisia, koska tukivarsien tuentapisteiden sijaintia voidaan siirtää lähes rajattomasti. Työn kohteena oleva akseli on jäykkä, joten sen erillisjousitettujen tuentojen tyyppejä ei tässä sen tarkemmin tarkastella.

Mitoituksen kohteena on siis jäykällä taka-akselilla varustettu etuvetoinen ajoneuvo. Tämä tarkoittaa sitä, että akselin tuentoihin ei vaikuta vetävistä pyöristä aiheutuvia voimia, joka yksinkertaistaa akseliin kohdistuvien voimien laskentaa. Etuvetoisen ajoneuvon jäykkien taka-akselien tuentaan käytetään monia erilaisia kokoonpanoja. Seuraavassa käsitellään tässä niistä yleisimmät, joihin suurin osa variaatioista perustuu.

2.2.1 Jäykkä palkki akseli

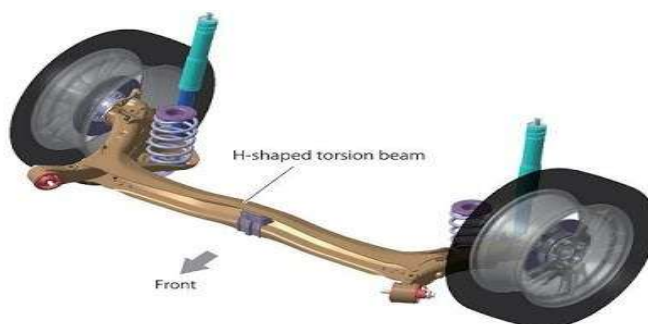
Jäykkäpalkkiakseli (Beam axle) koostuu nimensä mukaisesti jäykästä palkista, joka yhdistää renkaat, joka tuetaan sen etupuolelta suorilla tukivarsilla koriin. Se tarvitsee erillisen tukivarren rajoittamaan sivuttaisliikettä. Rajoittimena käytetään usein ns. Panhard-tankoa. Jousina on kierrejouset akselin ja korin välissä (kuva 1.).



Kuva 1. Palkkiakseli (Beam axle, front wheel drive 2018)

2.2.2 Puolijäykkä akseli

Puolijäykkä akseli (Twist axle, torsion beam axle) on rakenteeltaan hyvin samankaltainen kuin jäykkä palkkiakseli. Erilaisuuksia jäykkään palkkiin nähden on palkin sijoitus etummaisten kiinnityspisteiden ja renkaan napojen välissä, kun taas jäykällä palkilla sijoitus on suoraan renkaiden napojen välissä. Puolijäykän akselin renkaita yhdistävä palkki kiertyy itseensä nähden, renkaan joustotapahtuman aikana pyrkien palauttamaan itsensä suoraksi. Tästä johtuen kyseisessä akselimallissa ei tarvita erillistä kallistussenvakaajaa. Oikein mitoitettuna ratkaisu on kestävä ja toimiva (kuva 2). Mikäli etumaiset puslat ovat sijoitettuna kulmassa pitkittäisakseliin, nähden saadaan sivuttaisliliikettä rajoitettua ilman erillistä tuentaa.



Kuva 2. Taipuisa akselipalkki (H-shaped torsion beam 2018)

2.2.3 Lehtijousin tuettu taka-akseli

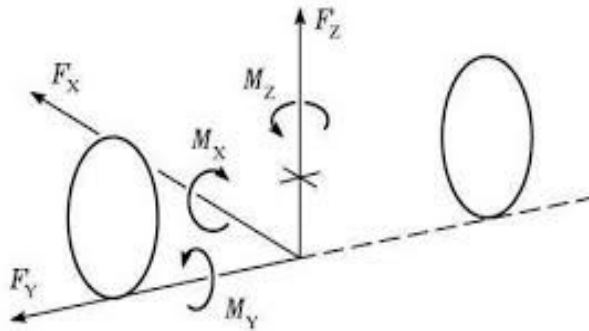
Nyt jo vanhanaikainen versio taka-akselin tuennasta on lehtijousilla tuettu jäykkä taka-akseli. Tämä kokoonpano on yksinkertaisin versio. Renkaita yhdistävä palkki on yhdistetty koriin lehtijousilla, jotka samalla toimivat tukivarsina. Ajomukavuus on tässä kokoonpanossa varsin vaatimatonta ja ajodynamiikkaan vaikuttamisen mahdollisuus hyvin rajallinen, koska säädettävyys on minimaalinen.

2.2.4 Monilinkkituenta

Linkki tarkoittaa tässä yhteydessä tukivartta, joilla akselin liikkeitä rajoitetaan halutulla tavalla. Linkkituntojen versioita on valtavasti. Linkkejä on yleensä 3 tai 4. Kolmivartissa tuennassa on yleensä kaksi tukivartta akselin reunoilla ja yksi keskellä. Tämä tuentatyyppi tunnetaan myös nimillä A-bar ja T-bar. Nimitykset tuleva keskimmäisen tukivarren mallista, joka muistuttaa A:ta tai T:tä. Tämä keskimmäinen tukivarsi tukee akselia myös sivuttain. Neljällä tukivarrella sama voidaan toteuttaa asettamalla ylemmät tukivarret kulmaan ajoneuvon pitkittäisakseliin nähden. Oli tuentatapa millainen variaatio tahansa ja jos tukivarsia ei ole poikittain tai kulmassa ajoneuvon pitkittäisakseliin nähden, tarvitaan akselille poikittaistuenta.

2.3 Akselin vapausasteet

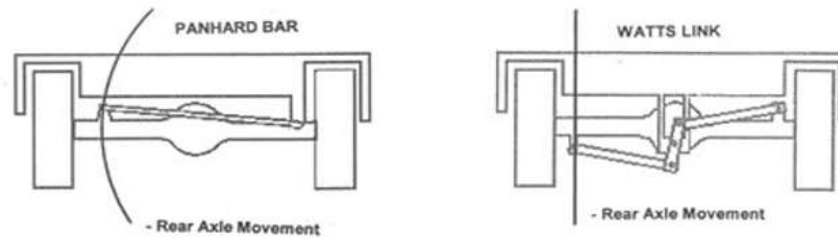
Kahden akselilla yhdistetyn renkaan järjestelmällä on kuusi vapausastetta (kuva 3). Akselin tuennalla rajoitetaan vapausasteet kahteen, pyörien rinnakkaiseen pystysuuntaiseen liikkeeseen suhteessa koriin ja pyörien eri suuntiin tapahtuvaan pystysuuntaiseen liikkeeseen korin kallistuessa. Tuennan tarkoitus on siis hallita akselin liikkeitä suunnissa jotka ovat haitallisia tai häiritseviä ajateltaessa ajo ominaisuuksia



Kuva 3. Akselin vapausasteet (Dixon 2009: 187)

2.4 Akselin poikittaistuenta

Kaikissa akselityypeissä akselin sivuttaisliikettä on rajoitettava. Osassa akselituentoja tämä on toteutettu akselin rakenteella. Erillisjousitetuissa akseleissa erilliset tukivarret on järjestetty niin, että sivuttaisliikettä ei pääse syntymään. Lehtijousilla tuetun akselin jousituksen ja tuennan muutoksissa tai tuennassa, jossa sivuttaisliikettä ei ole rakenteellisesti rajoitettu, on sivuttaisliikkeen rajoittamiseksi tehtävä lisämuutoksia. Poikittaistuenta käytetään useimmiten Panhard-tankoa, mutta watts-, woblink-, mumford- ja sliding block -tyyppiset tuennat ovat myös mahdollisia. Panhard-tanko on näistä yksinkertaisin ja yleisin, mutta sen huonona puolena on tangon säteittäisestä liikeradasta johtuva sivuttaisliike (kuva 4).



Kuva 4. Sivuttaistuentojen liikeratoja (Video: An Inside Look At BMR's Watts Link Setup For 4th Gen F-Bodies 2018)

2.5 Tuennan valinta ja tyyppi

Kyseessä olevan ajoneuvon ajo-ominaisuuksien parantamiseksi ei tällä kokoonpanolla ole paljonkaan tehtävissä. Vaihtoehdot olisivat joko vaihtaa koko akseli tai muuttaa vanhaa niin, että säädettävyys tulisi mahdolliseksi. Koko akselin vaihtaminen olisi hyvin hankalaa ajoneuvon korimallista ja lainsäädännöstä johtuen. Akselityypin vaihtaminen vaatisi uusien heilahduksenvaimentimien paikkojen valmistamisen eli ns. iskunvaimentimien tornien valmistamisen. Tuennan muuttaminen 4-linkkituennaksi mahdollistaa säätämisen ja korkeatasoisten heilahduksenvaimentimien, ja jousien avulla mahdollistetaan hyvin toimiva lopputulos.

Mitoitettavan tuennan tyyppiä valikoitui 4-linkkityyppinen monivarsi tuenta, jonka tukivarret ovat samansuuntaiset ja samanpituiset. Tästä tuentatavasta johtuen tarvitaan taka-akselille myös poikittaistuenta. Yksinkertaisin ja edullisin valinta olisi Panhard-tanko, mutta joustoliikkeen aikana Panhard-tanko aiheuttaa korille sivuttaisliikkeen ajoneuvon keskilinjaan ja akseliin nähden (kuva 4). Liike johtuu tangon säteittäisestä liikeradasta. Tämä siirtyä pienenee tangon pituuden kasvaessa, ja kyseessä olevan auton ollessa melko kapea, ei tämä valinta tullut kyseeseen. Toimintansa ja matalalla sijaitsevan kallistuskeskiön vuoksi päädyttiin watts- tai wob-linkkiratkaisuun. Kallistuksenvakaaja on vielä harkinnassa, koska siitä saatava hyöty on kyseenalainen. Myöskään auton takapää eikä ole vetävä eikä kovinkaan painava, joten korin aiheuttamasta painonsiirrosta ei kaarreajossa muodostu suurta ongelmaa.

Käytettäessä samansuuntaisia tukivarsia ilmenee, että hetkellinen nopeusnapa sijaitsee äärettömän kaukana, ja tästä etäisyydestä johtuen hetkellisen nopeusnavan korkeus muuttuu joustossa paljon. Tästä voi seurata dynaamisia ongelmia, mutta sitä kompensoidaan tekemällä tukivarsista niin pitkät kuin käytännössä mahdollista.

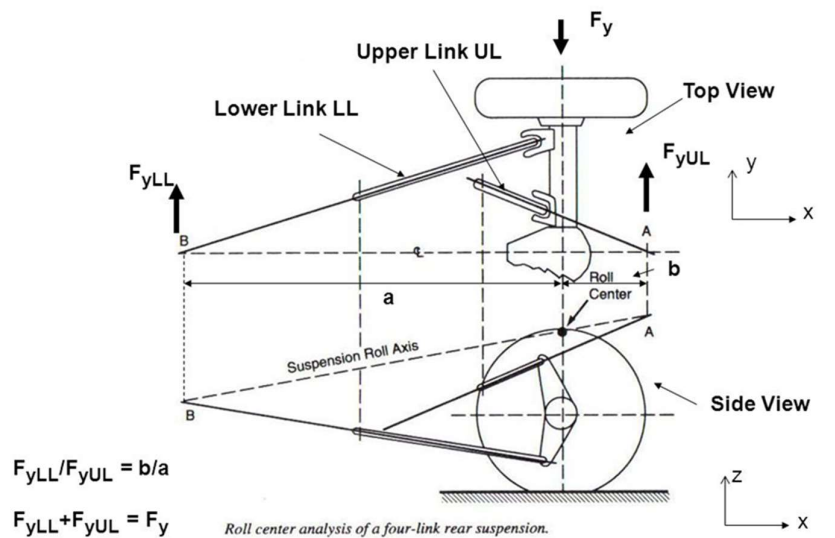
Tehdyistä valinnoista johtuen on hetkellisen nopeusnavan ja kallistuskeskiön sijainti on tiedossa, ja jos tukivarsien nivelpisteiden sijaintiin ei tehdä muutoksia, ei näitä pisteitä tarvitse erikseen määrittää. Jos kuitenkin muutoksia tehdään tukivarsien nivelpisteiden sijaintiin toisiinsa nähden, niin että määrityksestä tulee mahdollista, mallinnetaan hetkellisen nopeusnavan sijaintia myöhemmässä vaiheessa siihen tarkoitettun tietokone ohjelman avulla.

3 Ajodynamiikka

Ajodynamiikassa ajoneuvon koria ajatellaan kiinteänä kappaleena. Ajodynamiikalla tarkoitetaan ajoneuvon käyttäytymistä siihen kohdistuvien erilaisten voimien vaikutuksesta. Ajoneuvon dynamiikan tarkastelu voidaan viedä erittäin teoreettiseksi, mutta tässä työssä on tarkoitus käsitellä dynamiikkaa mahdollisimman käytännönläheisesti ja kuitenkin työn vaatimalla laajuudella. Jotta ajoneuvoa voidaan käsitellä dynaamisesti, on sen ominaisuuksia ensin tarkasteltava kinemaattisesti. Koska käytössä ei ole tarkkoja ajon aikaisia mittaustuloksia vastaavasta ajoneuvosta, joudutaan joissain kohdissa käyttämään olettamuksia.

3.1 Katsantoperspektiivit

Katsantoperspektiivit ovat käytännössä suuntia, joista akselin geometriaa tarkastellaan. Akseleita tarkastellaan yleensä edestä ja sivulta (kuva 5). Akseleiden tarkastelussa on myös mahdollista käyttää yläkatsantoperspektiiviä, josta voidaan tarkastella sivuttaisia rajoituspisteitä. Etuperspektiivistä tarkastellaan ajoneuvon geometrioiden käyttäytymistä sivuttaissuunnassa ja vastaavasti sivuttaistarkastelussa pitkittäiskäytöstä. Ajoneuvon ollessa kolmiulotteinen järjestelmä katsantosuunnilla se voidaan purkaa kahdeksi kaksituloitteiseksi järjestelmäksi, joiden tarkasteleminen on helpompaa.



Kuva 5. Ylä- ja sivukatsanto (Roll Center for 4-link Solid Axle 2018)

3.1.1 Yläkatsantoperspektiivi

Kallistusakselin löytämiseksi pitää määrittää sivuttaiset rajoituspisteet, jotka ovat määritettävissä yläkatsannosta. Nämä rajoituspisteet ovat määritettävissä myös etukatsannosta. Kallistusakselia määritettäessä ajoneuvoon, jossa käytetään sivuttaistuuntaa, käytetään rajoituspisteinä alatukivarsien ja sivuttaistuennan rajoituspisteitä. Tätä katsantoa käytetään melko harvoin.

3.1.2 Etukatsantoperspektiivi

Etukatsantoperspektiivistä ajoneuvon akseleiden tuentageometriaa tarkastellaan nimensä mukaisesti etuperspektiivistä. Etukatsannosta tarkastellaan geometrisia ominaisuuksia, jotka ovat nähtävissä edestäpäin. Tämän katsantoperspektiivin avulla määritellään esimerkiksi ajoneuvon kallistuskeskiön sijainti sivuttaissuunnassa. Tätä tarkastelua voidaan suorittaa niin etu- kuin taka-akselille. Erillistuentoja tarkastellaan yleensä tästä katsannosta. Akseli, joka on mitoituksen kohteena, on kuitenkin jäykkä, joten sillä ei siis ole poikittaisia tukivarsia. Näin ollen etukatsannosta ei juuri ole tässä tapauksessa hyötyä.

3.1.3 Sivukatsantoperspektiivi

Sivuttaiskatsantoperspektiivissä tuennan toimintaa tarkastellaan sivulta päin. Tällä tavoin voidaan määrittää samat asiat kuin etukatsannosta mutta pitkittäissuunnassa. Tätäkin tarkastelusuuntaa voidaan käyttää kummallekin akselille. Tämä katsanto on ehdottomasti tärkein muutoksen kohteena olevan akselin käsittelyssä.

3.2 Massakeskipiste

Massakeskipisteestä käytetään joskus nimitystä painopiste ja englanninkielisessä materiaalissa termiä Center of gravity. Tämän ajoneuvon massojen keskipisteen ympäri ajoneuvon jousitettu massa pyrkii pyörähtämään tai kallistumaan. Ajoneuvossa on useita massakeskipisteitä. Jousitetun ja jousittamattoman massan keskipiste ja kokoajoneuvon massa keskipiste. Koko ajoneuvon massakeskipisteen paikka määritetään pituus- ja pystysuunnassa. Tarvittavat tiedot tarvittavalla tarkkuudella pystytään määrittämään koko ajoneuvon massakeskipisteen avulla. Tarkkuutta voitaisiin lisätä mittaamalla kaikki massakeskipisteet niin etu- kuin taka-akselilla. Näiden pisteiden avulla saataisiin tarkka massakeskipisteen paikka selville ja voitaisiin määrittää massakeskipisteakselin sijainti ja suunta. Jousitetun ja jousittamattoman massan massakeskipisteiden sijainnit ovat kuitenkin hyvin työläitä määrittää, ja tästä syystä niiden paikkoja ei määritetä. Jos etu ja taka-akselin massakeskipisteet määritettäisiin jousitetun tai jousittamattoman massan suhteen ylipäättään, voitaisiin määrittää massakeskipisteakselin tarkempi sijainti. Tarkkaa massakeskipisteakselia ei myöskään määritetä, koska etuakselin tuenta on rajattu työn ulkopuolelle. Kuitenkin oletetaan massakeskipisteakselin kulkevan vaakasuorassa ajoneuvon kokomassakeskipisteen läpi ajoneuvon keskilinjan suuntaisesti.

3.3 Massakeskipisteen sijainti

Ajoneuvon massakeskipiste vaihtelee ajoneuvon kuormauksen mukaan. Esimerkiksi matkustajat ja polttoaineen määrä vaikuttavat pisteen sijaintiin. Näiden epätarkkuus tekijöiden takia koko ajoneuvon massakeskipisteen sijainti riittää haluttujen tietojen selvittämiseksi.

Massakeskipiste liittyy ajoneuvon käyttäytymiseen ja ajodynamiikkaan keskeisesti. Massakeskipisteen sijainti tienpintaan nähden toisin sanoen sen korkeus- ja pituussuuntainen sijainti akseleihin nähden vaikuttaa mm. kiihdytykseen ja jarrutukseen sekä moniin muihin ominaisuuksiin tai niiden määrittämiseen. Massakeskipisteen halutaan sijaitsevan mahdollisimman matalalla. Kaikissa ominaisuuksissa massakeskipisteen sijainnin halutaan olevan mahdollisimman lähellä tienpintaa. Mitä lähemmäs tienpintaa massakeskipiste saadaan, sitä vähemmän dynaamisia ongelmia esiintyy; samalla myös kaarreajo- ja jarrutusominaisuudet paranevat.

Massakeskipisteen mittaamisessa tarvittavat mitat on otettu ajoneuvosta sen tämänhetkisessä kunnossa. Jousituksen kannakkeiden ruostevaurioiden takia tulokset eivät välttämättä ole aivan tarkkoja, mutta massakeskipisteen sijainnista saadaan kuitenkin melko hyvä kuva.

3.3.1 Pituussuuntainen paikka

Massakeskipisteen sijainnin selvittämiseksi akselien suhteen ajoneuvon renkaiden alle asetettiin ajoneuvopuntarit. Punnitus suoritettiin akseli kerrallaan niin, että puntaritoman akselin renkaiden alle asetettiin puntareiden korkeutta vastaavat alustat, jotta ajoneuvo olisi vaakatasossa mittauksen tarkkuuden varmistamiseksi. Akselimassa saadaan summaamalla saadut rengasmassat akselikohtaisesti yhteen. Ajoneuvon kokonaismassa saadaan laskemalla akselimassat yhteen seuraavan kaavan avulla:

$$m_{V,t} = m_{V,f} + m_{V,r} \quad (1)$$

jossa

$$m_{V,t} = \text{kokonaismassa (kg)} \quad m_{V,f} = \text{etuakselin massa (kg)}$$

$$m_{V,f} = \text{etuakselin massa (kg)}$$

$$m_{V,r} = \text{takaakselin massa (kg)}$$

Jotta massakeskipiste voidaan sijoittaa ajoneuvoon, on sille laskettava paikka etäisyytenä suhteessa akseleihin, joten on sille seuraavaksi laskettava massakeskipisteen sijainti akselien suhteen seuraavalla kaavalla:

$$l_f = \frac{m_{V,r}}{m_{V,t}} l; l_r = \frac{m_{V,f}}{m_{V,t}} l = l - l_f \quad (2)$$

jossa

l_f = etäisyys etuakselista

l_r = etäisyys taka – akselista

(Reimpell ym. 2001: 388.)

Samalla kaavalla voidaan laskea sivuttaissuuntainen sijainti vertaamalla ajoneuvon oikeata ja vasenta sivua. Käsiteltävän ajoneuvon massakeskipisteen pituussuuntaiseksi paikaksi saatiin etuakselin 531kg ja taka-akselin 376kg massoilla ja 2625mm akselivälillä, $1536,80\text{mm}$ taka-akselin etupuolella.

3.4 Korkeus

Massakeskipisteen korkeus saadaan selville tarkastelemalla yhtä akselia toista nostettaessa ja seuraamalla tukivoimien muutoksia noston aikana. Mitä korkeammalle autoa pystytään nostamaan, sitä tarkempi on lopputulos. Jos ajoneuvo pystytään nostamaan renkaan kosketuspinnasta, voidaan tätä lukemaa käyttää suoraan. Akselista nostettaessa joudutaan käyttämään korjauslukemaa renkaiden muodon muutoksesta johtuen.

Laskettaessa massakeskipisteen korkeutta tarvitaan nostokorkeutta Δh eli pystysuoraa korkeutta nostopinnasta, vaakasuoran lattia pinnan ja renkaan kosketuspinnan välillä. Lisäksi tarvitaan akseliväliä l ja ajoneuvon kokonaismassaa $m_{V,t}$. Seuraavalla kaavalla saadaan tulokseksi massakeskipisteen korkeus:

$$h_V = \frac{l}{m_{V,t}} \frac{\Delta m}{\Delta h} (l^2 - \Delta h^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

jossa

$h_v = \text{massakeskipisteen korkeus} = \text{akseliväli}$

$l = \text{akseliväli}$

$m_{v,t} = \text{kokonais massa}$

$\Delta m = \text{massan muutos}$

$\Delta h = \text{nostokorkeus}$

(Reimpell ym. 2001: 388.)

Nostokorkeuden ollessa melko pieni 320mm , eivät tulokset ole erityisen tarkkoja, mutta jousituksen kiinnityksen ruostevauriot muutenkin aiheuttavat tuloksiin virhettä. Akselia nostettiin kymmenen kertaa, jotta voidaan käyttää keskiarvoa yksittäisen mittauksen sijaan. Massakeskipisteen korkeudeksi saatiin kaikkea $259,19\text{mm}$ ja $324,94\text{mm}$ välillä, ja keskiarvoksi tuli $324,56\text{mm}$.

3.5 Kallistuskeskiö

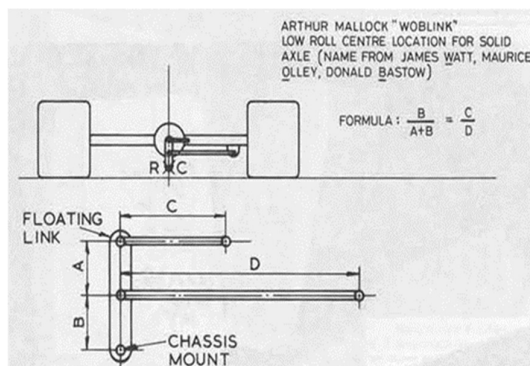
Suurin osa asiaa koskeva materiaalista on kirjoitettu englanniksi, jossa kallistuskeskiötä kutsutaan roll centeriksi. Kallistuskeskiö voidaan määrittää ajoneuvon kummallekin akselille, mutta koska muutoksen kohteena on vain taka-akseli, ei etuakselin kallistuskeskiötä määritellä. Varsinaista kallistusakselia ei siis tästä syystä voida määrittää. Pyöräntuennan kallistuskeskiö on piste, jonka ympäri jousitettu massa kallistuu tarkasteltavalla akselilla. Kallistuskeskiö sijaitsee pyörän keskiöiden välisellä pystysuoralla tasolla, symmetrisessä pyöräntuennassa ajoneuvon pitkittäisakselin keskilinjalla. Kallistuskeskiö on piste, jonka kautta renkaiden aiheuttamat tukivoimat vaikuttavat koriin, ja näin se on yksi kaarreikäyttymiseen vaikuttava tekijä. (Smith 1978: 29–30.)

Kallistuskeskiötä on useita erilaisia: geometrinen, kinemaattinen sekä voima- ja momenttiperustainen. Tässä tarkastelussa keskitytään geometriseen kallistuskeskiöön,

koska se on hyvin määriteltävissä ja riittää tarkkuudeltaan tuentageometrioiden tarkasteluun. Tarkastelu suoritetaan graafisesti etu- tai sivukatsannosta.

Alkuperäisessä tuennassa kallistuskeskiö asettuu taka-akselin keskilinjalle ja akseliputken yläpuolelle noin 200mm. Tarkan mitan saaminen on haastavaa, koska jousituksen kiinnityspisteet ovat kärsineet mittavia ruostevaurioita. Uudessa tuennassa kallistuskeskiö asettuu akseliputken alapuolelle noin 50mm.

Tarkasteltavan akselin rakenteesta ja siitä uudesta tavasta, jolla akseli on tuettu, määrytyy kallistuskeskiön sijainti, eikä sen sijaintia näin ollen tarvitse erikseen määrittää. Tämä johtuu valitusta poikittaistuennasta. Sivukatsannossa jäykän akselin, joka on varustettu Watts- tai Woblink -sivuttaistuennalla (kuva 6), kallistuskeskiö on linkkien niveltapin keskellä. Etukatsannossa kallistuskeskiö asettuu myös linkkien niveltapin keskelle. Näin ollen kallistuskeskiön paikka voidaan määrittää näillä tiedoilla, mutta tilannetta tarkastellaan tietokoneella graafisesti tuentageometrioiden suunnitteluvaiheessa.



Kuva 6. Woblinkin rakenne ja kallistuskeskiö (Staniforth 2006: 44)

3.6 Hetkellinen nopeusnapa

Hetkellistä nopeusnapaa kutsutaan englanninkielisessä materiaalissa nimellä instant center. Koska taka-akselilla ei ole tukivarsia, on hetkellisen nopeusnavan geometrisen paikan määrittäminen alkuperäiselle akselille haastavaa. Uudessa tuennassa, jossa tukivarret ovat samansuuntaiset, hetkellinen nopeusnapa on äärettömän kaukana. Tämä johtuu tukivarsien samansuuntaisuudesta, joka aiheuttaa sen, ettei pitkittäin tukivarsien nivelpisteiden läpi kulkevat apusuorat koskaan leikkaa toisiaan. Koska tuennasta tulee

monipuolisesti säädettävä, tarkastellaan hetkellisen nopeusnavan sijaintia säätöjen eri asennoissa tuennan geometrioiden suunnitteluvaiheessa.

3.7 Antigeometriat

Ajoneuvon kori siirtää painoa akselilta toiselle ajotilanteesta riippuen. Painon siirto aiheuttaa koriin ajoneuvon pitkittäisakselin suuntaista liikettä. Tätä painonsiirtoa tapahtuu ajoneuvon kiihdyttäessä ja jarruttaessa. Reitti, jolla paino siirtyy, riippuu akselin tuenta-geometriasta samoin kuin ajoneuvon sivuttaisessa painonsiirrossa. Pituussuuntaisessa tilanteessa määräävistä tekijöistä käytetään termiä antigeometria.

Antigeometrioita on yleisesti käytössä neljää erilaista: anti-dive, anti-lift, anti-rise ja anti-squat. Kaikille näistä ominaisuuksista löytyy vastaavat geometriat ja näissä käytetään joskus etuliitettä pro. Tämä voi olla hieman sekavaa, koska geometriat ovat toisiensa vastaominaisuuksia. Pääsääntöisesti lähteissä kuitenkin käytetään antigeometria-termejä.

3.7.1 Anti-dive

Jarrutustilanteessa tukivarsien kautta tapahtuvaa nyökkäystä etuakselilla kuvataan termillä anti-dive ja se on käytännössä etupään laskemisen estämistä jarrutettaessa. Samansuuntaisilla tukivarsilla haittapuolena on pyörän liikkuminen noustessaan eteenpäin, joka epätasaisella pinnalla työntää pyörää töyssyjä kohti. Tästä seuraa jousituksen kovuutta ja joissain tapauksissa iskuja ohjaukseen sekä epävakautta jarrutuksessa. Hyvän ohjausgeometrian saavuttaminen myös hankaloituu.

Henkilöautoissa on normaalisti käytetty korkeintaan 50 %:n anti-dive-geometriaa. Suurempi antigeometria on ongelmallinen hitaissa kaarteissa, joissa isoista ohjauskulmista yhdistettynä sivuttaiseen kiihtyvyyteen aiheutuu merkittävä koria nostava ilmiö. Kilpa-autoissa, useimmissa tapauksissa, toimivimmiksi ovat osoittautuneet 20–25 %:n anti-dive-geometriat. Painavissa etumoottorisissa autoissa voidaan käyttää hieman suurempaa, muttei kuitenkaan yli kolmeakymmentä prosenttia.

3.7.2 Anti-rise

Jarrutustilanteessa tukivarsien kautta tapahtuvaa pitkittäissuuntaista korin kallistelua taka-akselilla kuvataan termillä anti-rise. Takavetoisessa autossa harvoin keskitytään anti-rise-geometriaan ja sen annetaan määräytyä anti-squat-geometrian sivutuotteena.

3.7.3 Anti-lift

Kiihdytystilanteessa tukivarsien kautta tapahtuvaa pitkittäissuuntaista korin kallistelua etuakselilla kuvataan termillä anti-lift. Ominaisuus on käytössä vain vetävällä etuakselilla.

3.7.4 Anti-squat

Kiihdytystilanteessa tukivarsien kautta tapahtuvaa nyökkäystä etuakselilla kuvataan termillä anti-squat. Käytännönläheisemmin ilmaistuna anti-squat tarkoittaa peräpään laskeamisen estämistä kiihdytettäessä. Ominaisuus on käytössä vain vetävällä taka-akselilla, ja maltillisena se onkin yleinen. Ominaisuus voi aiheuttaa pidon heikkenemistä epätasaisella alustalla, ja noin 20 % anti-squat onkin tästä suhteessa rajana. Yleensä anti-squat-ominaisuutta tarvitaan camber-muutoksen kontrolloimiseksi, joten jäykän taka-akselin kanssa ei tälle juuri ole tarvetta. Etuakselilla ongelmaksi havaittua pyörien eteenpäin liikkumista ei takana ole, sillä geometria on takana toisinpäin. Pyörien liikkuminen taaksepäin töyssyyn osuessaan on luonnollisempi tilanne.

Kohdeauton ollessa etuvetoinen ja käsittelyssä vain taka-akseli ei kaikkia anti-geometrioita pystytä määrittämään. Taka-akselin osalta jää ainoaksi mahdolliseksi käsiteltäväksi anti-rise-ominaisuus. Anti-rise-ominaisuudella hallitaan jarrutuksen aiheuttamaa pitkittäissuuntaista korin kallistelua taka-akselilla, ja takavetoisessa ajoneuvossa se muodostuu anti-squat-ominaisuuden sivutuotteena. Anti-rise-ominaisuus ja sen säätäminen on osoittautunut hankalaksi edellä mainitun riippuvaisuuden anti-squat-ominaisuudesta.

4 Alustaan kohdistuvat voimat

Alustaan kohdistuvat voimat tulee määrittää, jotta alustassa käytettävät komponenttien lujuudet voidaan mitoittaa riittäviksi. Mitoituksen ollessa virheellinen voivat seuraukset pahimmassa tapauksessa olla kohtalokkaat niin ajoneuvolle kuin kuljettajalle.

Ajoneuvon alustaan kohdistuu lähes jatkuvaa kuormitusta, niin ajoradan epätasaisuuksista kuin myös erilaisista ajotapahtumista johtuen. Saatavilla ei ole ajonaikaista dataa, millaisia kuormia alustan komponentteihin kohdistuu, ja tästä syystä joudutaan tekemään teoreettisia ajotilanteita ja olettamuksia.

Tästä työstä on jätetty pois heilahduksenvaimennus ja jousitus, mikä poistaa näiden komponenttien mitoituksen tarpeen. Heilahduksenvaimentimien ja jousituksen tehtävänä on pystysuuntaisten voimien ja liikkeiden hallinta. Käsittäväksi siis jää ajoneuvon pituusakselin suuntaiset ja siihen poikittain kohdistuvien voimien määrittäminen.

Poikittaissuuntaisia voimia syntyy ajoneuvon ajosuunnan poiketessa suorasta linjasta, toisin sanoen ohjauspyörää käännettäessä. Pitkittäisvoimia vuorostaan syntyy kiihdytys ja jarrutustilanteissa. Näiden yhdistelmiä ilmenee myös, mutta voiman resultantti voidaan aina jakaa kahteen osaan, pitkittäiseen ja poikittaiseen. Laskenta voidaan viedä erittäin teoreettiseksi ja näin selvittää erittäin monimutkaisia ajotilanteita, käsittelemällä niitä matemaattisesti ja hyvinkin tarkasti, mutta pyrkimys on pitää työ varsin käytännönläheisenä.

Ajoneuvon sivuttaisliikettä rajoitetaan erillisellä tuennalla. Sivuttaisvoimat kohdistuvat näin ollen tähän rakenteeseen. Sivuttaisvoimien määrittelyyn tehdään oletama ajoneuvosta kaarteessa. Rakenteiden kestävyys varmistamiseksi arvot ovat liioiteltuja, ja myös itse tilanne on melko äärimmäinen samasta syystä.

Ajoneuvon painonsiirtoa ei ole otettu huomioon vaan ajoneuvo on oletettu kiinteäksi kapaleeksi laskennan yksinkertaistamiseksi; myös akseliin kohdistuva kuorma on suurin tieliikenteessä sallittu kyseiselle ajoneuvolle. Oletettuun kaarreajotilanteeseen on oletettu hyvin pienisäteinen kaarre Suomen tieliikenteessä suurimmalla sallitulla nopeudella. Ajoneuvon renkaiden kitkakerroin on myös varsin voimakkaasti liioiteltu.

4.1 Sivuttainen kuorma

Oletetaan ajoneuvon ajavan 120 km/h kaarteeseen jonka säde on 15 m , suurimmalla sallitulla kuormalla, niin että renkaat eivät luista ajoradanpintaan nähden (kuva 7). Sivuttain vaikuttava voima saadaan laskettua kaavalla

$$F = m * \frac{v^2}{s} \quad (4)$$

jossa

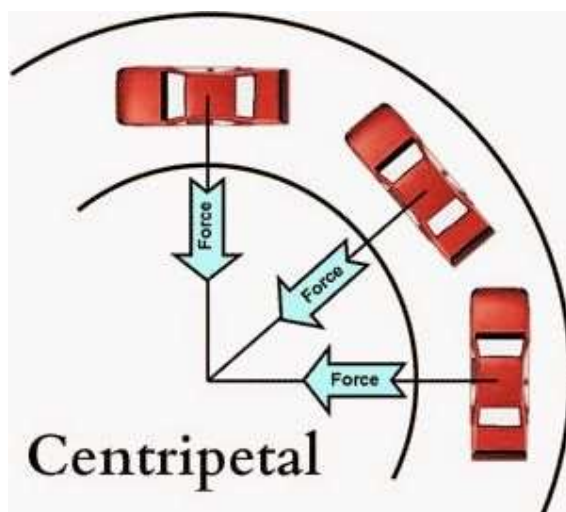
$$F_s = \text{voima}(N)$$

$$m = \text{massa}(kg) = 1620\text{ kg}$$

$$v = \text{ympyräliikkeen nopeus}(m/s) = 33, \frac{1}{3} m/s$$

$$r = \text{ympyrän säde}(m) = 15\text{ m}$$

Tulokseksi saadaan 120 kN .



Kuva 7. Kaarreaajo. (pinterest.com,)

Laskennassa ajoneuvon massan on oletettu olevan pistemäinen. Koko ajoneuvon massan siis ajatellaan olevan taka-akselilla, joten varsinaista varmuuskerrointa ei tarvita.

4.2 Pitkittäiskuorma

Pitkittäiskuormat vaikuttavat akselin pitkittäistuennan kiinnityspisteisiin ja tukivarsiin. Koska taka-akselin tuennan tukivarret ovat ajoneuvon pitkittäisakselin suuntaisia ja poikittaistuenta estää akselin sivuttaisliikkeet, ei pitkittäistuentaan kohdistu poikittaisia voimia. Tukivarsien ollessa samansuuntaisia niihin kohdistuu vain vetoa ja puristusta. Pysytysuuntaiset voimat kohdistuvat heilahduksenvaimentimiin ja jousiin, joiden käsittely on jätetty tämän työn ulkopuolelle.

Pitkittäistukivarsien mitoittamiseksi on niihin kohdistettava kuormitusta. Kuormitustilanteena laskennan suhteen on seuraavanlainen: Ajoneuvon suurin sallittu tieliikenteessä sallittu massa sijoitetaan pistemäisenä kuormana taka-akselin kohdalle jarrutustilanteessa. Näin saadaan mahdollisimman suuri rasitus kohdistettua taka-tukivarsiin. Kitkan aiheuttama taaksepäin suuntautuva voima välittyy takarenkaiden kautta taka-akselin tuentaan.

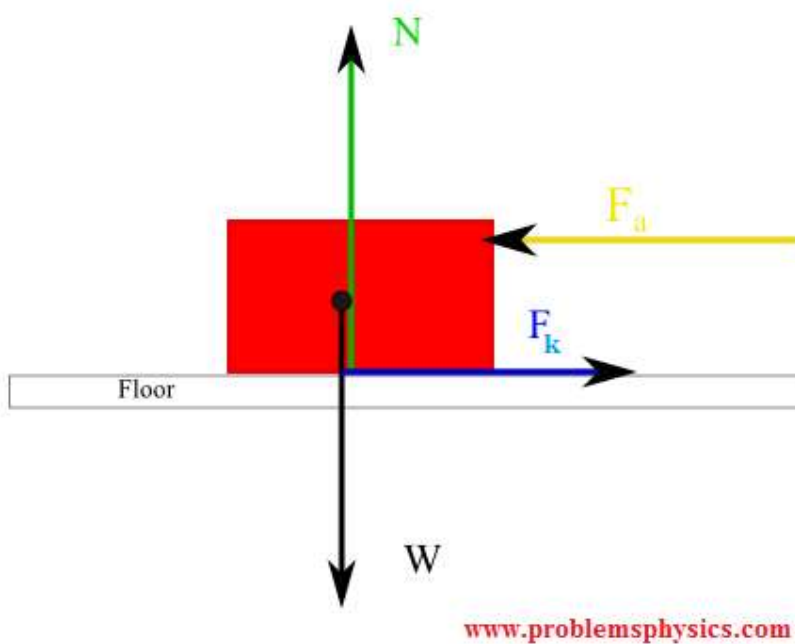
Ajoneuvon etuvetoisuudesta johtuen ei taka-akseliin kohdistu tasauspyörästä ja vetävistä renkaista johtuvia voimia. Laskennassa on tehty yksinkertaistuksia (kuva 8), joita on kompensoitu ylimitoittamalla muita voimia, joita kyseessä oleviin komponentteihin kohdistuu. Renkaan ja tien välinen kitka on yhdistelmä erilaisia kitkatyyppejä. Staattinen kitkakerroin on suurimmillaan juuri ennen kuin rengas lukittuu ja alkaa liukua, ja sen arvo on silloin suurempi kuin kineettisen kitkakertoimen. Laskennassa käytetty kitkakerroin on liioiteltu ja ajateltu sijoittuvan tälle maksimaalisen jarrutuksen alueelle, jotta tukivarsiin

aiheutuisi

mahdollisimman

suuret

voimat.



Kuva 8. Renkaaseen vaikuttavat voimat (Forces of Friction 2018)

Lasketaan renkaaseen kohdistuva voima seuraavalla kaavalla:

$$F_k = \mu * N \quad (5)$$

jossa

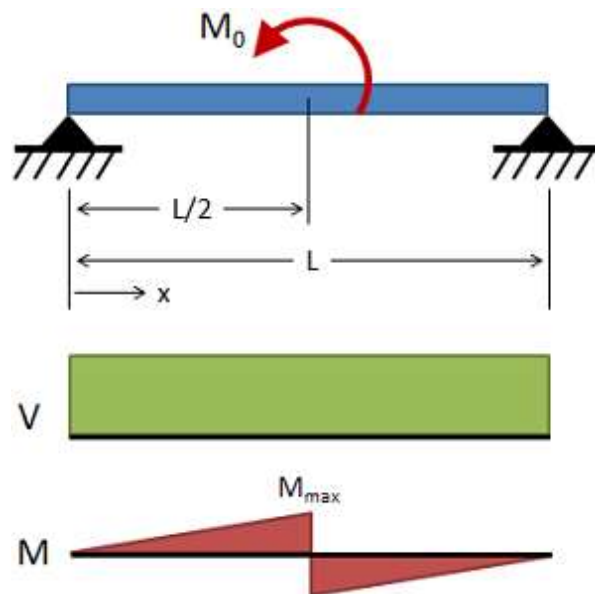
F_k = kitkan aiheuttama voima(N)

μ = kitkakerroin = 1,2

N = tukivoima = $m * g = 1620\text{kg} * 9,81\text{ m/s}^2$

Tulokseksi saadaan 19070,69N.

Tämä voima vaikuttaa renkaan halkaisijan muodostaman varren kautta akseliin muodostaen siihen vääntömomentin. Tämä momentti aiheuttaa tukireaktion tukivarsiin ja niiden tukipisteisiin. Tukivarsien ollessa kiinnitetty taka-akselin ylä ja alapuolelle jäykällä kiinnikkeillä, niin että niiden voidaan ajatella olevan kiinnitettynä samaan jäykkään palkkiin. Ylä- ja alatukivarsien taaempien nivelpisteiden keskikohta on pystysuoralla linjalla taka-akselin keskikohdan kanssa. Näin ollen ajatellaan tilannetta niin, että tukivarsien takapäät ovat kiinni jäykän palkin päissä ja keskellä palkkia on momenttikuorma (kuva 9).



Kuva 9. Momenttikuorma keskellä palkkia (Stresses & Deflections in Beams 2018)

Tukipisteet ovat tukivarsien kiinnityspisteet, joiden keskellä oleva momenttikuorma aiheuttaa tukivarsiin tukireaktiot. Momentti saadaan laskettua kaavalla

$$M = F * l \quad (6)$$

jossa

$M = \text{momentti (Nm)}$

$F = \text{voima (N)}$

$l = \text{etäisyys voiman vaikutus pisteestä (m)}$

Tässä tapauksessa l on renkaan säde. Renkaan ollessa kokoa 205/50R15 saadaan säteeksi 209,75 mm. Näin renkaan keski kohtaan vaikuttaa 4000,077 Nm suuruinen momentti. Kun momentti tunnetaan, voidaan laskea tukivarsien kuormitukset kaavalla

$$-T_o = T_v = \frac{M}{l} \quad (7)$$

Jossa

T_o = tukivoima oikea = alatukivarsi

T_v = tukivoima vasen = ylätukivarsi

M = momentti (Nm)

l = tukipisteiden välinen etäisyys (m)

Tukivarsien kiinnitysreikiä tulee olemaan useita, jotta on mahdollista muuttaa ominaisuuksia ajotilanteeseen sopiviksi. Suurin taivutusmomentti on kuorman vaikutuspisteen vieressä. Näin ollen kuorma lasketaan pienimmällä mahdollisella tukivarsienkiinnityspisteiden välisellä etäisyydellä, joka tulee olemaan n. 140mm. Laskennasta saadaan tulokseksi 28571,98N. Edellä laskettu voima vaikuttaa positiivisena ylätukivarteen aiheuttaen siihen puristusta ja vastaavasti yhtä suurena mutta negatiivisena alatukivarteen aiheuttaen siihen vetoa. Tukivarret voidaan siis mitoittaa vahvuudeltaan samanlaisiksi. Jos tukivarsien etäisyyttä toisistaan tai taka-akselin keskipisteen suhteen muutetaan, on helppoa tarkistaa, kuinka paljon uusi sijainti vaikuttaa tukivarsien kuormitukseen, vain vaihtamalla kaavaan uusien kiinnityspisteiden etäisyydet taka-akselin keskipisteestä.

5 Lujuuslaskenta

Edellisessä osiossa määritettyjen voimien ja rasituksien perusteella voidaan ryhtyä määrittämään komponenteille ja niiden liitoksille riittäviä lujuuksia. Tarvittavia komponentteja

ovat tukivarret ja tukivarsien kiinnityskorvakkeet. Määritellään myös hitsausseamien lujuuksia ja tarvittavien pulttien ja muttereiden mitoitus. Poikittaistuennan osien mitoittaminen on myös tarpeen samassa laajuudessa.

5.1 Perusaine

Tukivarsien ja niiden kiinnityspisteiden materiaali tulee olemaan teräs jossain muodossaan. Teräslaatuja on huomattava määrä erilaisia. Muutoksen kohteena olevasta ajoneuvosta ei olla tekemässä kilpa-autoa, joten materiaalin paino ei ole määräävä tekijä sen valinnassa. Riittävän lujuus ja työstettävyydet ovat merkitsevämpiä tekijöitä.

Teräksen lujuus ilmoitetaan yleensä yksikössä megapascal (MPa) joka vastaa suoraan yksikköä newtonia per neliömillimetri (N/mm^2). Näin ollen yksikkömuunnoksille ei tässä yhteydessä ole tarvetta. Kappaleen leikkauksen pinta-alan avulla voidaan näin laskea tarvittava ainevahvuus. Pinta-ala lasketaan kappaleen kapeimmasta kohtaa esimerkiksi reiän kohdalta.

5.2 Pultit ja mutterit

Pulttien ja muttereiden lujuudet on merkittävä niihin valmistajan toimesta, pois lukien kaikkein pienimmät, joihin merkinnät eivät mahdu. Pulteissa ja muttereissa on useita lujuusluokkia esim. 8.8, 10.9 ja 12.9. Nämä luvut ovat merkittynä niille sopivaan paikkaan mutta niin, että ne ovat helposti luettavissa. Luvuista ensimmäinen ennen pistettä on murtolujuus $\cdot 100$ yksiköllä N/mm^2 . Pultti merkinnällä 12.9 tarkoittaa siis pultin murtolujuuden olevan $1200 N/mm^2$. Toinen luku kertoo murto- ja myötörajan suhteen, joka on tässä tapauksessa $1200 \cdot 0,9 = 1080$. Myötöraja on näin ollen $1080 N/mm^2$. Muttereiden on oltava lujuusluokaltaan vähintään samoja kuin pulttien. Pulttien mitoitus voidaan aloittaa laskemalla pultin varren poikkipinta-ala kaavalla

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (8)$$

jossa

$$A = \text{pinta} - \text{ala}$$

$$\pi = \text{vakio}$$

$$r = \text{ympyrän säde}$$

Otetaan esimerkiksi 10M-pultti, lujuusluokaltaan 12.9 ja nimellishalkaisijaltaan 10mm. Kaavan nro 5 avulla pinta-alaksi saadaan $78,54\text{mm}^2$. Pinta-ala kerrotaan myötöraja arvolla 1080N/mm^2 . Näin saadaan maksimikuorman suuruudeksi 84823N , näin ollen kuorman ollessa 120000N , ei tätä pulttia voida hyväksyä. Sama laskelma 12M-pultille ja tuloksena on 122148N . Voidaan todeta, että 12M12.9 -pultti kestää vaaditun rasituksen. Poikittaistuennan pultteina voidaan siis käyttää esimerkkinä toiminutta pulttityyppiä.

5.3 Pitkittäistuennan materiaalit ja mitoitus

Pitkittäistukivarsiin kohdistuu $28571,98\text{N}$ suuruinen rasitus. Tämän rasituksen tukivarsien pitää siis kestää. Tarkastelun tuloksena löydettiin useita sopivia materiaalivaihtoehtoja. Tarkastellaan SSAB:ltä saatavaa ohutseinäputkea Docol tube 590, jonka murtolujuus on $R_m = 590\text{MPa}$ ja myötöraja $R_{p0,2} = 500\text{MPa}$. Valitaan putken ulkohalkaisijaksi 25mm ja seinämävahvuudeksi 2mm . Putken materiaalivahvuuden pinta-ala saadaan seuraavalla kaavalla:

$$A = \pi * r^2 \quad (9)$$

jossa

$$A = \text{ympyrän pinta} - \text{ala}$$

$$\pi = \text{vakio}$$

$$r = \text{ympyrän säde}$$

Ensin lasketaan putken kokonaispinta-ala, joka on $A_1 = 490,87\text{mm}^2$ ja josta vähennetään putken tyhjän sisäosan pinta-ala, joka voidaan laskea samalla kaavalla, kunhan säteestä vähennetään 1mm . Näin saadaan tulokseksi $A_2 = 415,48\text{mm}^2$. Kun $A_1 - A_2$ on $75,40\text{mm}^2$, saadaan lujuus kertomalla saatu pinta-ala, myötörajan arvolla 500MPa eli

$$75,40\text{mm}^2 * 500\text{MPa}$$

ja tulokseksi saadaan $37699,1\text{N}$, joka ylittää tarvittavan tukivarteen kohdistuvan $28571,98\text{N}$ kuormituksen. Tuennan ollessa symmetrinen kuormat jakautuvat vasemmalle ja oikealle yhtä suurina. Laskelmat on kuitenkin laskettu niin, että yhdelle puolelle kohdistuu koko kuorma. Kuormat siis ovat todellisuudessa puolet pienempiä, ja tuennan kestävyys kuormien suhteen on siis kaksinkertainen tarvittavaan nähden. Tukivarsista ei ylimitoitettunakaan muodostu fyysisesti ylisuuria. Jos tukivarsien mittoja ei muuteta, muodostuu tästä ylimitoituksesta tukivarsille varmuuskerroin 2. Seuraavassa luvussa tukivarsien kiinnityskorvakkeiden mitoituksessa pätee sama, koska korvakkeita tulee kaksi per tukivarren kiinnityspiste.

Tukivarsien korvakkeiden pitää myös kestää sama kuormitus kuin tukivarsien. Tutkiskelun jälkeen löydettiin jälleen lukuisia materiaaliveitoehtoja. Päätettiin pitäytyä saman toimittajan tuotteissa. Pelkästään SSAB:n valikoimista löytyi useita vaihtoehtoja. Valittiin SSAB weathering 355, 3mm vahvuksena, jonka myötöraja on 355MPa .

Tukivarren korvakkeisiin halutaan 6 reikää, jotta taka-akselin tuentaa voidaan säätää monipuolisesti. Korvakkeen korkeudeksi tulee 210mm , ja 10mm reikiä on 6 kpl. Aiemmin laskettiin 10M12.9 -pultin lujuudeksi 84823N , joka riittää mainiosti tukivarsien kiinnitykseen. Kun korvakkeen paksuus on 3mm ja korkeus 210mm , saadaan pinta-alaksi 600mm^2 . Koska lujuuden määrittäminen pitää tehdä kappaleen ohuimmalta kohdalta, on se tehtävä reikien kohdalta. Kokonaiskorkeudesta vähennetään reikien viemä korkeus eli $6 * 10\text{mm} = 60\text{mm}$, ja vähennyksen jälkeen jäljelle jää 150mm . Näin ollen $3\text{mm} * 150\text{mm} = 450\text{mm}^2$. Joka kerrotaessa myötöraja arvolla 355MPa saadaan tulokseksi 159750N , joka ylittää tarvittavan $28571,98\text{N}$ lujuuden moninkertaisesti. Voidaan varmuudella sanoa, että kyseinen materiaaliveitinta on riittävä takatukivarsien niin etu- kuin takakorvakkeiden valmistamiseen. (Teräsrakenneliitokset 2018.)

5.4 Poikittaistuennan materiaalit

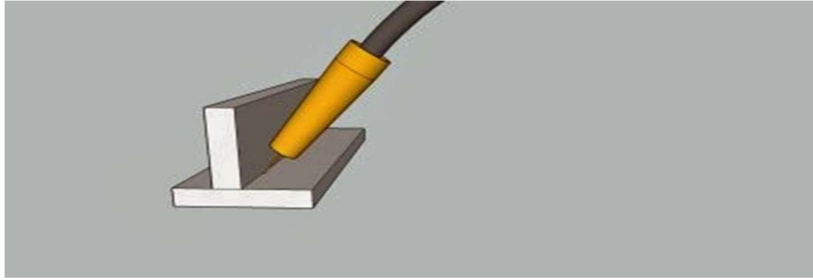
Osiossa 5.2 Pultit ja mutterit, laskettiin poikittaistuentaan tarvittavien pulttien ja muttereiden lujuusvaatimuksia. 12.9-lujuusluokan kiinnitystarvikkeet osoittautuivat riittäviksi.

Poikittaistuentaan tarvittavien korvakkeiden materiaali päätettiin pitää samana kuin tukivarsien korvakkeiden materiaalin erinomaisen lujuuden vuoksi. Watts-linkin korvakkeisiin kohdistuu $120000N$ kuorma. Kappaleelta, joka on valmistettu materiaalista, jonka lujuus on $355 N/mm^2$, vaaditaan pinta-alaa $338,03mm^2$ jotta se kestää tämän voiman. Jaetaan tarvittava pinta-ala materiaalin vahvuudella ($3mm$) ja saadaan korvakkeen korkeudeksi $112,68mm$. Kun korvakkeessa pitää olla yksi $12mm$ reikä, on korvakkeen korkeuden oltava vähintään $124,68mm$. Korvakkeita on 2 kpl, yksi tukivarren kummallakin puolella, joten vaadittu korkeus voidaan puolittaa. Tarkka mitta on korvaketta kohden $124,68/2 = 62,34mm$. Tulos Voidaan varmuudeksi pyöristää ylöspäin, esimerkiksi $65mm$:iin tai $70mm$:iin.

5.5 Hitsit

Hitsausseamat eli hitsit on myös syytä mitoittaa riittäviksi. Hitsien täyteaine on lähtökohteisesti aina kovempaa kuin perusaine. Hitsauksesta syntyvä lämpö myös usein aiheuttaa ympäröivään perusaineeseen jännityksiä ja karkaistumista. Tähän voidaan vaikuttaa jälkikäsittelyllä, esimerkiksi päästämisellä, mutta koska ajoneuvo on suuri kappale ja kiinnitykset sijaitsevat usein korissa, on jälkikäsittely usein mahdotonta. Riittävä ainepaksuus ja hitsien sijoittaminen mahdollisimman kauas toisistaan auttavat vähentämään näitä ilmiöitä. Itse hitsi harvoin pettää; yleensä vaurio syntyy hitsin viereen, jos näin pääsee käymään. Mitoitetaan hitsin a-mitta, joka tunnetaan myös z-mittana, joka on suurimman kolmion korkeus, joka voidaan piirtää railon kylkien ja hitsin pinnan sisään mitattuna kohtisuorassa suunnassa kolmion uloimpaan pintaan nähden. A-mitalla varmistetaan hitsin riittävä kestävyys. Mitan määrittämisessä käytetään apuna teräsrakenteiden liitosten mitoittamiseen tarkoitettua eurokoodi 3 -ohjeistusta. Varsinaiseen täyteaineen valintaan ei tässä työssä oteta kantaa.

Hitsistä, jota tullaan käyttämään, käytetään nimitystä otsapienahitsi (kuva 10).



Kuva 10. Otsapienahitsi (Teräksen aineiliitostekniikoita osa 1: MIG/MAG-hitsaus)

Otsapienahitsiin vaikuttavavoima F_w on puolet kokonaisvoimasta F , koska otsapienahitsissä on kaksi erillistä hitsiä, yksi kummallakin puolella pystyosaa. Otsapienahitsin a-mitta saadaan seuraavalla kaavalla:

$$a \geq \sqrt{3} * \frac{\beta_w * \gamma_{ma} * F_w}{l * f_u} \quad (10)$$

jossa

a = hitsin kylkimitta

β_w = ns.korrelaatio kerroin

γ_{m2} = varmuus luku yleensä 1,25

F_w = hitsiin vaikuttava voima

l = hitsin pituus

f_u = vetomurtolujuus

Arvo f_u , on heikoimman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo, joka voidaan haluttaessa laskea kaavasta

$$f_u = \frac{f_{u,perusaine}}{\beta_w} \quad (11)$$

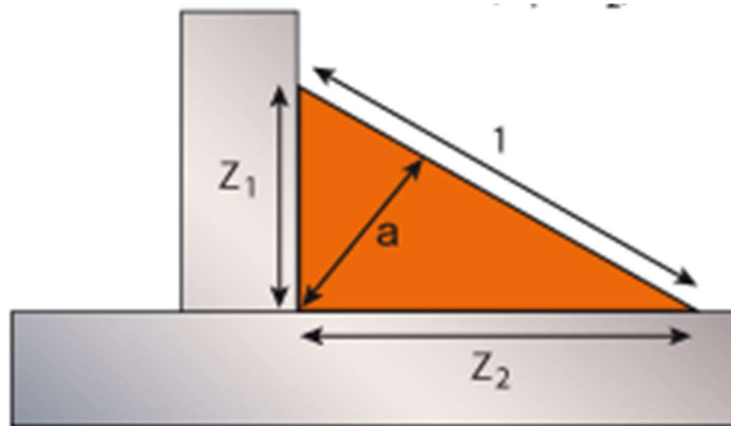
jossa

$f_{u,perusaine}$ = perusaineen vetomurtolujuus

β_w = ns.korrelaatiokerroin

Korrelaatiokerroin on 1 kaikille ruostumattomille teräksille, ellei kokeellisesti ole muuta todettu. Esimerkiksi rakenneteräkselle S355 korrelaatiokerroin on 0,9.

Lasketaan arvo f_u :lle. SSAB weathering 355:tä käytettiin hitsattavien kappaleiden mitoituksessa, joten sitä käytetään myös tässä yhteydessä. Murtolujuus kyseessä olevalle materiaalille on $510 - 680 MPa$. Käytetään pienintä annettua arvoa, jotta ollaan turvallisella puolella lopputuloksessa. Siis $f_u = 510 MPa / 0,9$, saadaan $459 MPa$. Kuormana käytetään poikittaistuennan $120000 N$. Kaavan nro 6 mukaan saadaan a-mitaksi (kuva 11) $65 mm$ hitsille $6,65 mm$. Eurokoodi 3 -ohjeistuksen mukaan minimi-a-mitan tulee olla vähintään $3 mm$. Laskennallisen a-mitan ylittäessä annetun minimiarvon, käytetään lasketua $6,65 mm$:ä. Vastaavasti pitkittäistuennan hitseille saatiin a-mitaksi $4,44 mm$. Hitsejä, joiden tehollinen pituus on alle $30 mm$ tai 6 kertaa a-mitta, ei käsitellä voimaa siirtävinä. Pienempien osien hitseissä voidaan joutua tilanteeseen, jossa tämä voi vaikuttaa varsinaiseen hitsaamiseen.



Kuva 11. Hitsin a-mitta (Calculating weld volume and weight 2018)

6 Tuentageometrian suunnittelu

Geometriasta ja ajokäytöksestä pyritään saamaan mahdollisimman neutraali, kuitenkin niin että kaarreajo-ominaisuudet saataisiin alkuperäistä paremmaksi. Normaalisti poikkeaviin ajotilanteisiin halutaan kuitenkin pystyä vaikuttamaan. Niinpä tuentatyypiksi valittiin 4-linkkituenta ja erillinen poikittaistuenta, koska tämä tuentatapa mahdollistaa erittäin monipuolisen säädettävyyden. Ajoneuvossa päädyttiin käyttämään samansuuntaisia ja yhtä pitkiä tukivarsia, joiden pituus pyritään maksimoimaan mahdollisten dynaamisten ongelmien minimoimiseksi.

Ajoneuvon etuvetoisuuden vuoksi taka-akselin antigeometriaominaisuuksista suurinta osaa ei pystytä hyödyntämään vetävien pyörien aiheuttamien voimien puuttumisen takia. Samainen seikka toisaalta yksinkertaistaa taka-akselin säätämistä, koska voimia jotka takavedon tasauspyörästä aiheuttaa ei ole. Jäykän akselin geometrian suunnittelu perustuu tuennankallistusakselin ja nopeusnavan määrittämiseen (Milliken & Milliken 1995: 623).

Koska tuennasta tehdään säädettävä, on järkevää myös selvittää sen tarjoamia mahdollisuuksia, joten tarkastellaan hetkellisen nopeusnavan sijaintia tietokone avusteisesti. Tähän käytetään Jerry Bickelin 4-Link Wizard- ja Tim McAmisin Chassis Master -ohjelmia. (ETC Racing programs, Inc. 2004 & 2006.)

6.1 Alkuperäinen tuenta

Alkuperäisessä akselin tuennassa tukivarsien tehtävästä vastasivat lehtijouset, jotka samalla tietenkin toimivat jousina. Ajoneuvon alkuperäiseen käyttötarkoitukseen eli tavarankuljetukseen suunniteltu taka-akselin tuenta on toimiva, mutta se ei tarjoa ajomukavuutta eikä juurimuitakaan ajo-ominaisuuksia normaaliajossa.

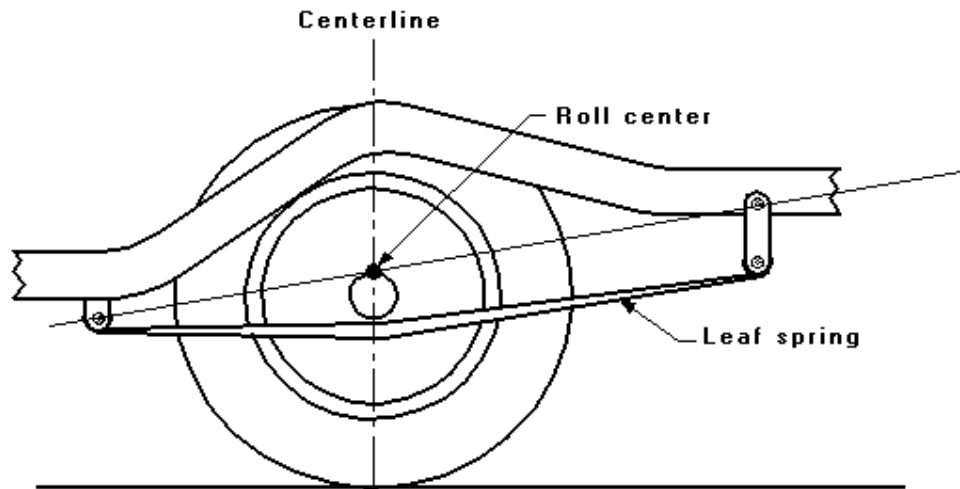
Koska kallistuskeskiö on varsin korkealla alkuperäisessä tuennassa eikä kallistuksen vakaimia ole kummallakaan akselilla vakiona, ovat kaarre ajo-ominaisuudet varsin rajalliset, mutta niitä hieman korjaa ajoneuvon kohtuullisen pieni oma massa.

Taka-akselin hetkellinen nopeusnapa on melko lähellä etuakselia. Tätä ei aivan tarkasti pystytty mittaamaan ja laskemaan, koska takajousituksen ripustukset ovat kärsineet varsin mittavia ruostevaurioita.

Tuennan kallistusakseli on kallellaan eteenpäin, mutta tässäkin tarkan kulman mittaaminen tai laskeminen on mahdotonta ruostevaurioista johtuen. Alla olevasta kuvasta nähdään periaatteellinen kallistuskeskiön sijainti ja kallistusakselin suunta (kuva 11).

Taka-akselin antigeometrioista ei pystyä ajoneuvon etuvetoisuudesta johtuen hyödyntämään kuin anti-rise-ominaisuutta, jonka teoreettinen mitoittaminen on osoittautunut hankalaksi, koska ominaisuus määritetään yleensä anti-squat-ominaisuuden sivutuotteena. Anti-squat-ominaisuutta ei taas taka-akselille voida määrittää, koska ajoneuvo on etuvetoinen.

FIGURE 16: HOTCHKISS REAR AXLE



Kuva 12. Kallistuskeskiö ja tuennan kallistusakseli (Automobile Ride, Handling, and Suspension Design 2018)

6.2 Uusi tuenta

Uuden tuennan geometrian suunnittelu tehdään miltei puhtaalta pöydältä, koska vanhaa tuentaa ei paranneta vaan se korvataan täysin ja toisentyypisellä tuennalla. Uudella tuennalla mahdollistetaan hetkellisen nopeusnavan sijainnin säätäminen niin korkeuskuin pituussuunnassa. Vaikkei työssä käsitelläkään heilahduksenvaimentimia tai jousia, tulevat uudet olemaan täysin säädettävissä olevat coil-over-tyyppiset. Tuennan suunnittelussa on myös huomioitu seikka, että uudet heilahduksenvaimentimet mahdollistavat ajokorkeuden säätämisen. Tuennan ominaisuuksia voidaan tässäkin tapauksessa säätää halutun kaltaiseksi laajan säädettävyyden ansiosta, esimerkiksi haluttaessa pitämällä hetkellisen nopeusnavan sijainti samana ajokorkeutta laskettaessa. Mitoituksen toimivuuden varmistamiseksi on syytä tarkastella akselin liikerataa ja ylipäättään akselin liikkuuutta.

Yläkatsannosta katsottuna saman suuntaisten tukivarsien liikeradat ovat symmetriset, joten voidaan todeta, että tästä suunnasta katsottuna akseli pääsee liikkumaan siltä vaaditulla tavalla.

Tarkasteltaessa sivukatsannosta päällekkäisten tukivarsien liikeratoja kuitenkin huomataan, että niiden väliset liikeradat eivät ole täysin saman suuntaisia. Tukivarren liikeradan ollessa kaari eivät ylemmän ja alemman tukivarren akselin puoleiset päät liiku samalla kaarella, vaikka tukivarret olisivat yhtä pitkiä. Tätä seikkaa tarkasteltiin yksinkertaisella mittoihin piirretyllä CAD-mallilla (liite 5), ja ohjelmana käytettiin ilmaista FREECAD-nimistä CAD-piirustusohjelmaa. Tarkastelussa myös huomattiin liikeratojen eroavaisuuden olevan oletetulla toiminta-alueella varsin pientä, varsinkin kun tarkoitus on käyttää mahdollisimman pitkiä tukivarsia. Tukivarsien pituuden kasvaessa kasvaa samassa suhteessa niiden liikkeen tekemien kaarien säteet ja samalla myös liikeratojen muodostaman kaarien epäkeskeisyys pienenevät pienentäen liikeratojen eroa. Toiminnallisesti tämä liikerataero saadaan korjattua käyttämällä tukivarsien ulkopäissä eli korin puoleisissa päissä joustavaa liitosta kuten esimerkiksi kumi- tai uretaanipuslia. (Milliken & Milliken 1995: 623.)

Käytetyt tuentojen mallinnusohjelmat ovat vanhoja ja lähtöisin Yhdysvalloista, joten mitat ovat tuumina, ja tästä syystä mittamuutokset saattavat aiheuttaa pieniä mittavirheitä saatuihin arvoihin. Lisäksi pientä virhettä Chassis Master -ohjelman ja 4-link wizard -ohjelman välillä aiheuttaa ominaisuus Chassis Master -ohjelmassa, joka ei anna asettaa tukivarren akselin puoleista kiinnikettä suoraan akseliputken alapuolelle ns. nollamitalla. Chassis Master -ohjelma antaa squat/rise-prosentit ja arvion massakeskipisteen pituussuuntaisesta sijainnista etuakseliin nähden, jos asettaa aloitussivulla pyydetty arvot. Kumpikin ohjelma laskee maksimissaan 625 hetkellisen nopeusnavan paikkaa annetuilla tukivarsien kiinnityspisteiden sijainneilla. Kuten jo edellä mainittiin, tuentojen mallinnusohjelmat ovat varsin vanhoja, mikä tuotti ongelmia hetkellisen nopeusnavan pituus- ja korkeustietojen saamiseksi tämän työn liitteeksi.

Chassis Master -ohjelman aloitussivulla annettujen tietojen perusteella ohjelma laski ajoneuvon painopisteen olevan $43,3in$ etuakselin takapuolella, joka on $1086,83mm$. Työn massakeskipisteosiossa laskettiin ajoneuvon punnitustuloksista massakeskipisteen etäisyydeksi etuakselista $1088,2mm$. (liite 2).

4-link Wizard -ohjelmassa määritellään ensin akselin paikka sekä kiinnitysreikien lukumäärä ja asema. Seuraavana kirjataan halutut mitat reikien välille, joista ohjelma laskee kaikki tukivarsien asentoyhdistelmät ja niihin liittyvät hetkellisten nopeusnapojen korkeudet maasta ja etäisyydet taka-akselista. (Liitteet 3. ja 4.)

Kaikki hetkellisten nopeusnapojen sijainnit ja korkeudet sekä tukivarsien asentoyhdistelmät löytyvät tämän opinnäytetyön liiteosiosta (liite 5).

Taka-akselilla ainoa mahdollinen säädettävä antigeometria on anti-rise, jonka todettiin vaativan varsin jyrkkiä tukivarsien kulmia toisiinsa nähden, ja näin ollen päätettiin antaa sen muodostua vapaasti. Lopulliset säädöt muutoinkin tehdään vasta koeajojen yhteydessä.

7 Yhteenveto

Työssä suunniteltiin ja mitoitettiin nelilinkkituenta Mk1 Volkswagen Caddy -malliseen ajoneuvoon. Työ aloitettiin käsittelemällä akselintuntojen tyyppejä ja niiden ominaisuuksia yleisesti. Perustietojen jälkeen siirryttiin teoreettisiin käsitteisiin ja teoriasta käytiin läpi asiat, jotka ovat välttämättömiä ymmärtää, jotta kokonaisuudesta saadaan toimiva. Teoria haluttiin pitää mahdollisimman lähellä käytäntöä, koska myös itse työstä haluttiin mahdollisimman käytännönläheinen.

Ajodynamiikkaan siirryttiin käsittelemällä ominaisuuksien määrittämisen kannalta tärkeisiin katsantokantoihin. Ajodynamiikkaa lisää käsiteltäessä käytiin läpi siihen keskeisesti kuuluvat käsitteet, kuten massakeskipiste, kallistuskeskiö, hetkellinen nopeusnapa ja akselin antigeometriat. Kun tarvittavat teoriatiedot akselin mitoitukseen ja ominaisuuksien määrittämiseen on ymmärretty, siirrytään käytännön mitoitukseen.

Mitoitus aloitettiin laskemalla alusteen kohdistuvia voimia. Eri komponenteille, myös kiinnitys tarvikkeille, laskettiin kuormitusta niiden oletetun käytön mukaan ja näin tulokseksi saatiin komponentteihin kohdistuvat voimat, joiden avulla pystyttiin laskemaan komponenteille niiltä vaadittavat lujuudet.

Kun voimat oli saatu selville, pystyttiin tuennan kokoonpanon komponenteille mitoittamaan materiaalit, joista ne on valmistettava. Tässä yhteydessä laskettiin myös hitseille riittävä vahvuus, jotta konstruktiosta saadaan kestävä.

Tämän jälkeen päästiin suunnittelemaan tuennan geometrioita. Suunnittelussa nousivat esiin tuennan monipuoliset säätömahdollisuudet, jotka mahdollistavat monien erityyppisten geometrioiden käyttöönoton.

Ajoneuvon etuvetoisuudesta johtuen ei taka-akselilla ole niin paljon ominaisuuksia, joita voisi muokata tai käyttää hyödyksi etuakselilla, mutta lopputuloksena saatiin kuitenkin hyvä kokonaisuus. Suunnittelun aikana ei varsinaisia yllätyksiä syntynyt.

Akselin ominaisuuksia suunnittelun kannalta tärkeimpiä ovat kallistuskeskiö hetkellinen nopeusnapa ja kallistusakseli. Tässä nimenomaisessa tapauksessa, kun poikittaisuennaksi valittiin tuenta tapa, joka määrää kallistuskeskiön sijainnin itsessään, saatiin yksi suunnittelun osa suhteellisen helposti tietoon. Hetkellisen nopeusnavan paikka taas pystytään tukivarsien paikkaa ja asentoa vaihtamalla asettamaan haluttuun paikkaan. Kallistusakselia pystytään tarkastelemaan sivuttaiskatsannosta, koska tukivarret ovat linjassa ajoneuvon pitkittäisakselin kanssa. Kallistusakselin kulmaa vaakatasoon nähden voidaan siis säätää myös säätämällä tukivarsien asentoa, koska takatuennan kallistusakseli kulkee kallistuskeskiön ja tukivarsien kiinnityspisteiden läpi piirrettyjen suorien leikkauspisteessä, joka on samansuuntaisten tukivarsien tapauksessa hyvin kaukana tai äärettömyydessä.

Huomattiin, että ominaisuuksien tai säätöjen liiallinen miettiminen teoriassa on varsin mielenkiintoista mutta melko turhaa, sillä todelliset säädöt löytyvät vasta koeajojen yhteydessä. Toinen huomio oli säätöjen olevan aina kompromissi, joka myös todettiin suurimmassa osassa kirjallista materiaalia.

Tuenta kokonaisuus muodostui varsin monipuolisesti säädettäväksi, ja se kuinka paljon säätämistä tarvitaan, jää nähtäväksi.

Lähteet

Automobile Ride, Handling, and Suspension Design. 2018. Verkkoaineisto. Robert Q. Riley Enterprises, LLC. <<https://www.rqriley.com/images/fig-16.gif>>. Luettu 12.3.2018.

Beam axle, front wheel drive. 2018. Verkkoaineisto. Tenneco Inc. <www.monroe.com.au/trade-corner/tech-info/suspension-systems/rear-suspension.html>. Luettu 8.4.2018.

Calculating weld volume and weight 2018. Verkkoaineisto. TWI Ltd. <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/calculating-weld-volume-and-weight-095/>>. Luettu 1.4.2018.

Data sheet. 2018. Verkkoaineisto. www.ssab.fi. <<https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-weathering-steel/products/ssab-weathering-355>>. Luettu 15.4.2018.

Data sheet. 2018. Verkkoaineisto. www.ssab.fi <https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/ohutseinaputket/tuotteet/docol-tube-590> Luettu 16.4.2018.

Dixon, J. C. 2009. Suspension Geometry and Computation. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Etc, Inc. 2004. Tim McAmis, Chassis Master. ETC Racing programs

Etc, Inc. 2006. 4-link Wizard. ETC Racing programs

Forces of Friction 2018. Verkkoaineisto. PhysicsProblems.com. <[www.physicsproblems.com. http://problemsphysics.com/forces/force_friction.html](http://problemsphysics.com/forces/force_friction.html)>. Luettu 30.2.2018.

H-shaped torsion beam. 2018. Verkkoaineisto. Caricos.com. <www.caricos.com/cars/h/honda/2012_honda_cr-z/images/163.html>. Luettu 27.3.2018.

Milliken, W. F. & Milliken D. L. 1995. Race Car Vehicle Dynamics. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.

- Penttilä, Timo. 2012. Kandidaattityö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/89989/Kandi_Timo_Penttila.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Reimpell, J.; Stoll, H. & Betzler, J. W. 2001. The Automotive Chassis: Engineering Principles. 2nd edition. Woburn: Butterworth-Heinemann.
- Roll Center for 4-link Solid Axle. 2018. Verkkoaineisto. imgur.com.
<<https://imgur.com/gallery/1fxD6>>. Luettu 1.4.2018.
- Staniforth, A. 2006. Competition Car Suspension: A Practical Handbook. 4th edition. Somerset: Haynes Publishing.
- Stresses & Deflections in Beams 2018. Verkkoaineisto. MechaniCalc, Inc. <<https://mechanicalcalc.com/reference/bolted-joint-analysis>>. Luettu 14.3.2018.
- Teräksen aineliitostekniikoita osa 1: MIG/MAG-hitsaus . 2018. Verkkoaineisto. Klaukkalan yläaste. <<http://kyatekninentyo.blogspot.fi/2013/10/teraksen-aineliitostekniikoita-osa-1.html>>. Luettu 28.3.2018.
- Teräsrakenneliitokset. 2018. Verkkoaineisto. Oulun ammattikorkeakoulu.
<<http://www.oamk.fi/~kaik/opiskelijat/TERASRAK2/TERASRAK-liitokset.pdf>>. Luettu 23.4.2018.
- Video: An Inside Look At BMR's Watts Link Setup For 4th Gen F-Bodies. 2018. Verkkoaineisto. Power Automedia. <<http://www.lsxmag.com/news/video-an-inside-look-at-bmrs-watts-link-setup-for-4th-gen-f-bodies/>>. Luettu 22.3.2018.

Chassis master -ohjelma

Chassis Master -ohjelman aloituslehti, jossa ajoneuvon tietokentät täytettynä.

Chassis Master

Car Information Hole Locations All IC Locations Filter Results Modifications

Car / Customer Information

Last First E-Mail Date Month Day Year

Address Web Serial No. / VIN

City State Zip Account No.

Country Car Description

Weight

Left Front	Right Front	LBS on Front	% Weight on Front
529.11	595.250	Total 1124.36	58.0%

Tire Pressure

Front
Right Rear
Left Rear

General

Cam Shaft Height (in) 26.9
Wheelbase (in) 103.35
Track (in) 55.38
Rear Tire Dia (in) 16.74

Estimated Center of Gravity Distance

Behind Front Wheel (in) 43.3
Off Center to Right Side 1.23

Shock Setting

Left Front Strut Setting Right Front Strut Setting

Front Spring Rate Calculate Rate

Left Rear Extension Setting Right Rear Extension Setting

Left Rear Compression Setting Right Rear Compression Setting

Rear Spring Rate Calculate Rate

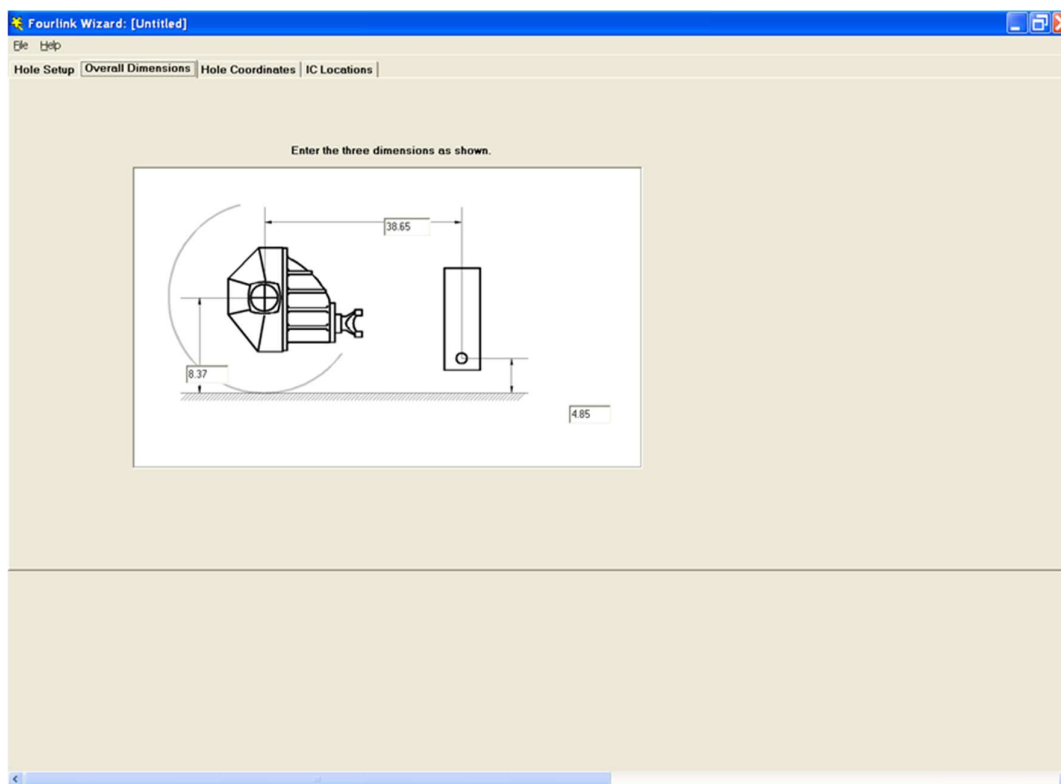
Print This Screen Only

Functions

Open / New Save Print Single Combination Print All Combinations Exit

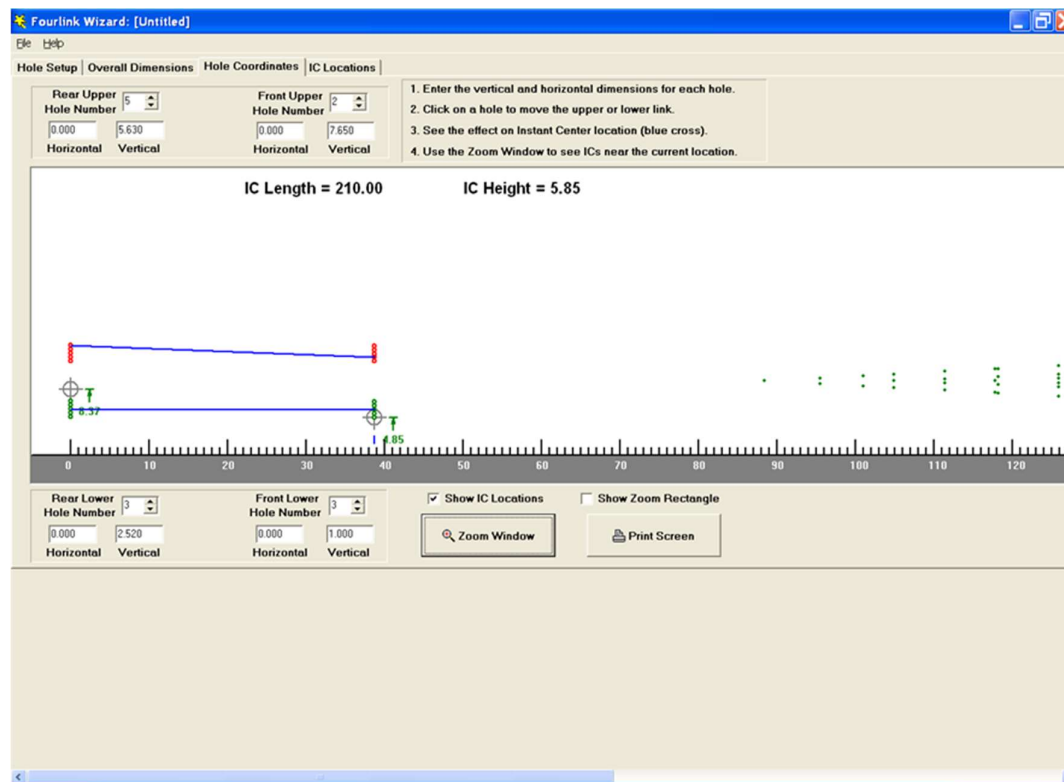
4-link Wizardin alkumäärittys

Tässä määritellään taka-akselin ja tukivarsien kiinnitysreikien asemat.



Hetkellisten nopeusnapojen mahdolliset sijainnit

Ohjelman määrittelemät hetkellisten nopeusnapojen sijainnit graafisesti esitettyinä. Kuvassa näkyy selkeästi myös tukivarsien asemat toistensa suhteen.



Hetkellisen nopeusnavan sijaintilistaus

4-link Wizard -ohjelman muodostama listaus hetkellisen nopeusnavan pituus- ja korkeustiedoista eri tukivarsien asennoissa

Hole Comb #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height	Hole Comb #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height
1	1	1	1	1	140.947	6.850	73	1	1	3	3	78.4475	5.3500
2	1	1	1	1	172.0609	4.3559	74	1	1	4	4	83.6242	4.7450
3	1	1	1	1	1.2750	1.2750	75	1	1	5	5	89.1513	4.1400
4	1	1	1	1	281.8233	-4.3000	76	1	1	6	6	106.6411	9.6687
5	1	1	1	1	422.5550	15.4500	77	1	1	7	7	117.4372	8.7121
6	1	1	1	1	112.5350	6.5500	78	1	1	8	8	137.0914	7.1571
7	1	1	1	1	122.3397	5.0987	79	1	1	9	9	151.8170	5.2350
8	1	1	1	1	140.9617	3.1333	80	1	1	10	10	169.1710	4.8000
9	1	1	1	1	169.1340	0.1600	81	1	1	11	11	187.2700	87.2700
10	1	1	1	1	211.3252	6.3000	82	1	1	12	12	204.3664	94.3664
11	1	1	1	1	241.9133	5.4916	83	1	1	13	13	232.4411	106.4411
12	1	1	1	1	54.9133	4.0625	84	1	1	14	14	261.5312	137.5312
13	1	1	1	1	105.7463	2.0714	85	1	1	15	15	292.6592	173.6592
14	1	1	1	1	120.5396	6.3003	86	1	1	16	16	323.8000	209.8000
15	1	1	1	1	78.3331	7.8333	87	1	1	17	17	354.9444	245.9444
16	1	1	1	1	85.3486	5.6287	88	1	1	18	18	386.0889	282.0889
17	1	1	1	1	94.0076	4.3722	89	1	1	19	19	417.2333	318.2333
18	1	1	1	1	105.1463	2.6888	90	1	1	20	20	448.3778	354.3778
19	1	1	1	1	116.2853	6.8500	91	1	1	21	21	479.5222	390.5222
20	1	1	1	1	70.3308	7.0308	92	1	1	22	22	510.6667	426.6667
21	1	1	1	1	77.5388	5.7406	93	1	1	23	23	541.8111	462.8111
22	1	1	1	1	84.6170	4.6500	94	1	1	24	24	572.9556	498.9556
23	1	1	1	1	94.0708	3.1333	95	1	1	25	25	604.1000	535.1000
24	1	1	1	1	104.1258	1.7273	96	1	1	26	26	635.2444	571.2444
25	1	1	1	1	114.1808	0.1413	97	1	1	27	27	666.3889	607.3889
26	1	1	1	1	124.2358	6.3500	98	1	1	28	28	697.5333	643.5333
27	1	1	1	1	134.2908	4.0250	99	1	1	29	29	728.6778	679.6778
28	1	1	1	1	144.3458	2.4857	100	1	1	30	30	759.8222	715.8222
29	1	1	1	1	154.4008	7.6444	101	1	1	31	31	790.9667	751.9667
30	1	1	1	1	164.4558	6.3500	102	1	1	32	32	822.1111	788.1111
31	1	1	1	1	174.5108	4.0250	103	1	1	33	33	853.2556	824.2556
32	1	1	1	1	184.5658	2.4857	104	1	1	34	34	884.4000	860.4000
33	1	1	1	1	194.6208	0.1413	105	1	1	35	35	915.5444	896.5444
34	1	1	1	1	204.6758	6.3500	106	1	1	36	36	946.6889	932.6889
35	1	1	1	1	214.7308	4.0250	107	1	1	37	37	977.8333	968.8333
36	1	1	1	1	224.7858	2.4857	108	1	1	38	38	1008.9778	1004.9778
37	1	1	1	1	234.8408	0.1413	109	1	1	39	39	1040.1222	1041.1222
38	1	1	1	1	244.8958	6.3500	110	1	1	40	40	1071.2667	1077.2667
39	1	1	1	1	254.9508	4.0250	111	1	1	41	41	1102.4111	1113.4111
40	1	1	1	1	264.0058	2.4857	112	1	1	42	42	1133.5556	1149.5556
41	1	1	1	1	274.0608	0.1413	113	1	1	43	43	1164.7000	1185.7000
42	1	1	1	1	284.1158	6.3500	114	1	1	44	44	1195.8444	1221.8444
43	1	1	1	1	294.1708	4.0250	115	1	1	45	45	1226.9889	1257.9889
44	1	1	1	1	304.2258	2.4857	116	1	1	46	46	1258.1333	1294.1333
45	1	1	1	1	314.2808	0.1413	117	1	1	47	47	1289.2778	1330.2778
46	1	1	1	1	324.3358	6.3500	118	1	1	48	48	1320.4222	1366.4222
47	1	1	1	1	334.3908	4.0250	119	1	1	49	49	1351.5667	1402.5667
48	1	1	1	1	344.4458	2.4857	120	1	1	50	50	1382.7111	1438.7111
49	1	1	1	1	354.5008	0.1413	121	1	1	51	51	1413.8556	1474.8556
50	1	1	1	1	364.5558	6.3500	122	1	1	52	52	1445.0000	1510.0000
51	1	1	1	1	374.6108	4.0250	123	1	1	53	53	1476.1444	1546.1444
52	1	1	1	1	384.6658	2.4857	124	1	1	54	54	1507.2889	1582.2889
53	1	1	1	1	394.7208	0.1413	125	1	1	55	55	1538.4333	1618.4333
54	1	1	1	1	404.7758	6.3500	126	1	1	56	56	1569.5778	1654.5778
55	1	1	1	1	414.8308	4.0250	127	1	1	57	57	1600.7222	1690.7222
56	1	1	1	1	424.8858	2.4857	128	1	1	58	58	1631.8667	1726.8667
57	1	1	1	1	434.9408	0.1413	129	1	1	59	59	1663.0111	1762.0111
58	1	1	1	1	444.9958	6.3500	130	1	1	60	60	1694.1556	1798.1556
59	1	1	1	1	455.0508	4.0250	131	1	1	61	61	1725.3000	1834.3000
60	1	1	1	1	465.1058	2.4857	132	1	1	62	62	1756.4444	1870.4444
61	1	1	1	1	475.1608	0.1413	133	1	1	63	63	1787.5889	1906.5889
62	1	1	1	1	485.2158	6.3500	134	1	1	64	64	1818.7333	1942.7333
63	1	1	1	1	495.2708	4.0250	135	1	1	65	65	1849.8778	1978.8778
64	1	1	1	1	505.3258	2.4857	136	1	1	66	66	1881.0222	2015.0222
65	1	1	1	1	515.3808	0.1413	137	1	1	67	67	1912.1667	2051.1667
66	1	1	1	1	525.4358	6.3500	138	1	1	68	68	1943.3111	2087.3111
67	1	1	1	1	535.4908	4.0250	139	1	1	69	69	1974.4556	2123.4556
68	1	1	1	1	545.5458	2.4857	140	1	1	70	70	2005.6000	2159.6000
69	1	1	1	1	555.6008	0.1413	141	1	1	71	71	2036.7444	2195.7444
70	1	1	1	1	565.6558	6.3500	142	1	1	72	72	2067.8889	2231.8889
71	1	1	1	1	575.7108	4.0250	143	1	1				
72	1	1	1	1	585.7658	2.4857	144	1	1				
					595.8208	0.1413	145	1	1				
					605.8758	6.3500	146	1	1				
					615.9308	4.0250	147	1	1				
					625.9858	2.4857	148	1	1				
					636.0408	0.1413	149	1	1				
					646.0958	6.3500	150	1	1				
					656.1508	4.0250	151	1	1				
					666.2058	2.4857	152	1	1				

Hoie Comd #	Rear Top Hoie #	Rear Bot Hoie #	Front Top Hoie #	Front Bot Hoie #	Instant Center Length	Instant Center Height	Hoie Comd #	Rear Top Hoie #	Rear Bot Hoie #	Front Top Hoie #	Front Bot Hoie #	Instant Center Length	Instant Center Height
153	N	N	1	3	269.1600	2.0000	233	N	5	4	3	116.2313	7.4875
154	N	N	1	3	131.3100	4.3000	234	N	5	5	5	131.6671	4.6567
155	N	N	1	3	807.3700	-28.6000	235	N	5	5	5	163.5950	4.5550
156	N	N	2	2	115.4243	7.9714	236	N	5	5	5	76.2475	0.9900
157	N	N	2	2	134.6450	6.3500	237	N	5	5	5	81.9507	0.9900
158	N	N	2	2	161.5340	4.2820	238	N	5	5	5	83.3710	0.9900
159	N	N	2	2	151.5740	4.2820	239	N	5	5	5	102.4300	6.0000
160	N	N	2	2	269.1800	-4.3000	240	N	5	5	5	115.2213	4.5550
161	N	N	2	2	89.7967	7.3333	241	N	5	5	5	70.3458	0.9885
162	N	N	2	2	101.0088	6.3500	242	N	5	5	5	75.2252	0.7782
163	N	N	2	2	115.4243	4.2820	243	N	5	5	5	87.9829	0.7782
164	N	N	2	2	134.6450	6.3500	244	N	5	5	5	92.1570	0.9650
165	N	N	2	2	161.5340	-4.0400	245	N	5	5	5	102.4300	4.5550
166	N	N	2	2	89.7967	7.1150	246	N	5	5	5	65.8836	0.3214
167	N	N	2	2	101.0088	6.3500	247	N	5	5	5	65.8836	0.3214
168	N	N	2	2	115.4243	4.2820	248	N	5	5	5	65.8836	0.3214
169	N	N	2	2	134.6450	6.3500	249	N	5	5	5	65.8836	0.3214
170	N	N	2	2	161.5340	4.2820	250	N	5	5	5	65.8836	0.3214
171	N	N	2	2	89.7967	7.1150	251	N	5	5	5	65.8836	0.3214
172	N	N	2	2	101.0088	6.3500	252	N	5	5	5	65.8836	0.3214
173	N	N	2	2	115.4243	4.2820	253	N	5	5	5	65.8836	0.3214
174	N	N	2	2	134.6450	6.3500	254	N	5	5	5	65.8836	0.3214
175	N	N	2	2	161.5340	4.2820	255	N	5	5	5	65.8836	0.3214
176	N	N	2	2	89.7967	7.1150	256	N	5	5	5	65.8836	0.3214
177	N	N	2	2	101.0088	6.3500	257	N	5	5	5	65.8836	0.3214
178	N	N	2	2	115.4243	4.2820	258	N	5	5	5	65.8836	0.3214
179	N	N	2	2	134.6450	6.3500	259	N	5	5	5	65.8836	0.3214
180	N	N	2	2	161.5340	4.2820	260	N	5	5	5	65.8836	0.3214
181	N	N	2	2	89.7967	7.1150	261	N	5	5	5	65.8836	0.3214
182	N	N	2	2	101.0088	6.3500	262	N	5	5	5	65.8836	0.3214
183	N	N	2	2	115.4243	4.2820	263	N	5	5	5	65.8836	0.3214
184	N	N	2	2	134.6450	6.3500	264	N	5	5	5	65.8836	0.3214
185	N	N	2	2	161.5340	4.2820	265	N	5	5	5	65.8836	0.3214
186	N	N	2	2	89.7967	7.1150	266	N	5	5	5	65.8836	0.3214
187	N	N	2	2	101.0088	6.3500	267	N	5	5	5	65.8836	0.3214
188	N	N	2	2	115.4243	4.2820	268	N	5	5	5	65.8836	0.3214
189	N	N	2	2	134.6450	6.3500	269	N	5	5	5	65.8836	0.3214
190	N	N	2	2	161.5340	4.2820	270	N	5	5	5	65.8836	0.3214
191	N	N	2	2	89.7967	7.1150	271	N	5	5	5	65.8836	0.3214
192	N	N	2	2	101.0088	6.3500	272	N	5	5	5	65.8836	0.3214
193	N	N	2	2	115.4243	4.2820	273	N	5	5	5	65.8836	0.3214
194	N	N	2	2	134.6450	6.3500	274	N	5	5	5	65.8836	0.3214
195	N	N	2	2	161.5340	4.2820	275	N	5	5	5	65.8836	0.3214
196	N	N	2	2	89.7967	7.1150	276	N	5	5	5	65.8836	0.3214
197	N	N	2	2	101.0088	6.3500	277	N	5	5	5	65.8836	0.3214
198	N	N	2	2	115.4243	4.2820	278	N	5	5	5	65.8836	0.3214
199	N	N	2	2	134.6450	6.3500	279	N	5	5	5	65.8836	0.3214
200	N	N	2	2	161.5340	4.2820	280	N	5	5	5	65.8836	0.3214
201	N	N	2	2	89.7967	7.1150	281	N	5	5	5	65.8836	0.3214
202	N	N	2	2	101.0088	6.3500	282	N	5	5	5	65.8836	0.3214
203	N	N	2	2	115.4243	4.2820	283	N	5	5	5	65.8836	0.3214
204	N	N	2	2	134.6450	6.3500	284	N	5	5	5	65.8836	0.3214
205	N	N	2	2	161.5340	4.2820	285	N	5	5	5	65.8836	0.3214
206	N	N	2	2	89.7967	7.1150	286	N	5	5	5	65.8836	0.3214
207	N	N	2	2	101.0088	6.3500	287	N	5	5	5	65.8836	0.3214
208	N	N	2	2	115.4243	4.2820	288	N	5	5	5	65.8836	0.3214
209	N	N	2	2	134.6450	6.3500	289	N	5	5	5	65.8836	0.3214
210	N	N	2	2	161.5340	4.2820	290	N	5	5	5	65.8836	0.3214
211	N	N	2	2	89.7967	7.1150	291	N	5	5	5	65.8836	0.3214
212	N	N	2	2	101.0088	6.3500	292	N	5	5	5	65.8836	0.3214
213	N	N	2	2	115.4243	4.2820	293	N	5	5	5	65.8836	0.3214
214	N	N	2	2	134.6450	6.3500	294	N	5	5	5	65.8836	0.3214
215	N	N	2	2	161.5340	4.2820	295	N	5	5	5	65.8836	0.3214
216	N	N	2	2	89.7967	7.1150	296	N	5	5	5	65.8836	0.3214
217	N	N	2	2	101.0088	6.3500	297	N	5	5	5	65.8836	0.3214
218	N	N	2	2	115.4243	4.2820	298	N	5	5	5	65.8836	0.3214
219	N	N	2	2	134.6450	6.3500	299	N	5	5	5	65.8836	0.3214
220	N	N	2	2	161.5340	4.2820	300	N	5	5	5	65.8836	0.3214
221	N	N	2	2	89.7967	7.1150	301	N	5	5	5	65.8836	0.3214
222	N	N	2	2	101.0088	6.3500	302	N	5	5	5	65.8836	0.3214
223	N	N	2	2	115.4243	4.2820	303	N	5	5	5	65.8836	0.3214
224	N	N	2	2	134.6450	6.3500	304	N	5	5	5	65.8836	0.3214
225	N	N	2	2	161.5340	4.2820	305	N	5	5	5	65.8836	0.3214
226	N	N	2	2	89.7967	7.1150	306	N	5	5	5	65.8836	0.3214
227	N	N	2	2	101.0088	6.3500	307	N	5	5	5	65.8836	0.3214
228	N	N	2	2	115.4243	4.2820	308	N	5	5	5	65.8836	0.3214
229	N	N	2	2	134.6450	6.3500	309	N	5	5	5	65.8836	0.3214
230	N	N	2	2	161.5340	4.2820	310	N	5	5	5	65.8836	0.3214
231	N	N	2	2	89.7967	7.1150	311	N	5	5	5	65.8836	0.3214
232	N	N	2	2	101.0088	6.3500	312	N	5	5	5	65.8836	0.3214

Hole Comd #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height	Hole Comd #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height
313	3	3	3	3	128.3233	5.9500	320	4	4	4	4	326.0233	1.4157
314	3	3	3	3	153.9740	3.3200	321	4	4	4	4	300.9850	-5.3750
315	3	3	3	3	152.4425	0.7750	322	4	4	4	4	617.6700	-25.7500
316	3	3	3	3	82.5356	0.1050	323	4	4	4	4	103.0617	6.8800
317	3	3	3	3	82.5356	0.1050	324	4	4	4	4	123.6153	5.0450
318	3	3	3	3	110.0100	5.9500	325	4	4	4	4	134.2750	2.3750
319	3	3	3	3	128.3233	4.1553	326	4	4	4	4	206.0233	-1.3000
320	3	3	3	3	153.9740	1.7900	327	4	4	4	4	306.9850	-9.4500
321	3	3	3	3	152.4425	0.7750	328	4	4	4	4	655.7700	15.0000
322	3	3	3	3	82.5356	0.1050	329	4	4	4	4	Param	Param
323	3	3	3	3	82.5356	0.1050	330	4	4	4	4	Param	Param
324	3	3	3	3	110.0100	4.4000	331	4	4	4	4	114.2340	0.0800
325	3	3	3	3	128.3233	2.4657	332	4	4	4	4	164.0175	6.3500
326	3	3	3	3	153.9740	11.7400	333	4	4	4	4	184.0175	4.5250
327	3	3	3	3	152.4425	0.7750	334	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
328	3	3	3	3	82.5356	0.1050	335	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
329	3	3	3	3	82.5356	0.1050	336	4	4	4	4	655.7700	15.0000
330	3	3	3	3	110.0100	4.4000	337	4	4	4	4	Param	Param
331	3	3	3	3	128.3233	9.9143	338	4	4	4	4	Param	Param
332	3	3	3	3	153.9740	11.7400	339	4	4	4	4	131.2340	6.3500
333	3	3	3	3	152.4425	0.7750	340	4	4	4	4	184.0175	4.5250
334	3	3	3	3	82.5356	0.1050	341	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
335	3	3	3	3	82.5356	0.1050	342	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
336	3	3	3	3	110.0100	4.4000	343	4	4	4	4	655.7700	15.0000
337	3	3	3	3	128.3233	9.9143	344	4	4	4	4	Param	Param
338	3	3	3	3	153.9740	11.7400	345	4	4	4	4	Param	Param
339	3	3	3	3	152.4425	0.7750	346	4	4	4	4	131.2340	6.3500
340	3	3	3	3	82.5356	0.1050	347	4	4	4	4	184.0175	4.5250
341	3	3	3	3	82.5356	0.1050	348	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
342	3	3	3	3	110.0100	4.4000	349	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
343	3	3	3	3	128.3233	9.9143	350	4	4	4	4	655.7700	15.0000
344	3	3	3	3	153.9740	11.7400	351	4	4	4	4	Param	Param
345	3	3	3	3	152.4425	0.7750	352	4	4	4	4	Param	Param
346	3	3	3	3	82.5356	0.1050	353	4	4	4	4	131.2340	6.3500
347	3	3	3	3	82.5356	0.1050	354	4	4	4	4	184.0175	4.5250
348	3	3	3	3	110.0100	4.4000	355	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
349	3	3	3	3	128.3233	9.9143	356	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
350	3	3	3	3	153.9740	11.7400	357	4	4	4	4	655.7700	15.0000
351	3	3	3	3	152.4425	0.7750	358	4	4	4	4	Param	Param
352	3	3	3	3	82.5356	0.1050	359	4	4	4	4	Param	Param
353	3	3	3	3	82.5356	0.1050	360	4	4	4	4	131.2340	6.3500
354	3	3	3	3	110.0100	4.4000	361	4	4	4	4	184.0175	4.5250
355	3	3	3	3	128.3233	9.9143	362	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
356	3	3	3	3	153.9740	11.7400	363	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
357	3	3	3	3	152.4425	0.7750	364	4	4	4	4	655.7700	15.0000
358	3	3	3	3	82.5356	0.1050	365	4	4	4	4	Param	Param
359	3	3	3	3	82.5356	0.1050	366	4	4	4	4	Param	Param
360	3	3	3	3	110.0100	4.4000	367	4	4	4	4	131.2340	6.3500
361	3	3	3	3	128.3233	9.9143	368	4	4	4	4	184.0175	4.5250
362	3	3	3	3	153.9740	11.7400	369	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
363	3	3	3	3	152.4425	0.7750	370	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
364	3	3	3	3	82.5356	0.1050	371	4	4	4	4	655.7700	15.0000
365	3	3	3	3	82.5356	0.1050	372	4	4	4	4	Param	Param
366	3	3	3	3	110.0100	4.4000	373	4	4	4	4	Param	Param
367	3	3	3	3	128.3233	9.9143	374	4	4	4	4	131.2340	6.3500
368	3	3	3	3	153.9740	11.7400	375	4	4	4	4	184.0175	4.5250
369	3	3	3	3	152.4425	0.7750	376	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
370	3	3	3	3	82.5356	0.1050	377	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
371	3	3	3	3	82.5356	0.1050	378	4	4	4	4	655.7700	15.0000
372	3	3	3	3	110.0100	4.4000	379	4	4	4	4	Param	Param
373	3	3	3	3	128.3233	9.9143	380	4	4	4	4	Param	Param
374	3	3	3	3	153.9740	11.7400	381	4	4	4	4	131.2340	6.3500
375	3	3	3	3	152.4425	0.7750	382	4	4	4	4	184.0175	4.5250
376	3	3	3	3	82.5356	0.1050	383	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
377	3	3	3	3	82.5356	0.1050	384	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
378	3	3	3	3	110.0100	4.4000	385	4	4	4	4	655.7700	15.0000
379	3	3	3	3	128.3233	9.9143	386	4	4	4	4	Param	Param
380	3	3	3	3	153.9740	11.7400	387	4	4	4	4	Param	Param
381	3	3	3	3	152.4425	0.7750	388	4	4	4	4	131.2340	6.3500
382	3	3	3	3	82.5356	0.1050	389	4	4	4	4	184.0175	4.5250
383	3	3	3	3	82.5356	0.1050	390	4	4	4	4	237.6350	-2.3000
384	3	3	3	3	110.0100	4.4000	391	4	4	4	4	327.6350	-19.6000
385	3	3	3	3	128.3233	9.9143	392	4	4	4	4	655.7700	15.0000
386	3	3	3	3	153.9740	11.7400							
387	3	3	3	3	152.4425	0.7750							
388	3	3	3	3	82.5356	0.1050							
389	3	3	3	3	82.5356	0.1050							
390	3	3	3	3	110.0100	4.4000							
391	3	3	3	3	128.3233	9.9143							
392	3	3	3	3	153.9740	11.7400							

Hole Comb #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height	Hole Comb #	Rear Top Hole #	Rear Bot Hole #	Front Top Hole #	Front Bot Hole #	Instant Center Length	Instant Center Height
472	4	4	5	3	102.957	6.7386	553	5	5	3	3	-305.7550	5.8500
473	4	4	5	3	102.9117	6.7386	554	5	5	3	3	-205.8233	8.5957
474	4	4	5	3	102.8640	6.7386	555	5	5	3	3	-154.3425	9.9250
475	4	4	5	3	102.8163	6.7386	556	5	5	3	3	-103.8617	11.2500
476	4	4	5	3	102.7686	6.7386	557	5	5	3	3	-53.3810	12.5750
477	4	4	5	3	102.7209	6.7386	558	5	5	3	3	-2.9000	14.0000
478	4	4	5	3	102.6732	6.7386	559	5	5	3	3	-47.6700	14.0000
479	4	4	5	3	102.6255	6.7386	560	5	5	3	3	-97.1400	14.0000
480	4	4	5	3	102.5778	6.7386	561	5	5	3	3	-146.6100	14.0000
481	4	4	5	3	102.5301	6.7386	562	5	5	3	3	-196.0800	14.0000
482	4	4	5	3	102.4824	6.7386	563	5	5	3	3	-245.5500	14.0000
483	4	4	5	3	102.4347	6.7386	564	5	5	3	3	-295.0200	14.0000
484	4	4	5	3	102.3870	6.7386	565	5	5	3	3	-344.4900	14.0000
485	4	4	5	3	102.3393	6.7386	566	5	5	3	3	-393.9600	14.0000
486	4	4	5	3	102.2916	6.7386	567	5	5	3	3	-443.4300	14.0000
487	4	4	5	3	102.2439	6.7386	568	5	5	3	3	-492.9000	14.0000
488	4	4	5	3	102.1962	6.7386	569	5	5	3	3	-542.3700	14.0000
489	4	4	5	3	102.1485	6.7386	570	5	5	3	3	-591.8400	14.0000
490	4	4	5	3	102.0998	6.7386	571	5	5	3	3	-641.3100	14.0000
491	4	4	5	3	102.0521	6.7386	572	5	5	3	3	-690.7800	14.0000
492	4	4	5	3	102.0044	6.7386	573	5	5	3	3	-740.2500	14.0000
493	4	4	5	3	101.9567	6.7386	574	5	5	3	3	-789.7200	14.0000
494	4	4	5	3	101.9090	6.7386	575	5	5	3	3	-839.1900	14.0000
495	4	4	5	3	101.8613	6.7386	576	5	5	3	3	-888.6600	14.0000
496	4	4	5	3	101.8136	6.7386	577	5	5	3	3	-938.1300	14.0000
497	4	4	5	3	101.7659	6.7386	578	5	5	3	3	-987.6000	14.0000
498	4	4	5	3	101.7182	6.7386	579	5	5	3	3	-1037.0700	14.0000
499	4	4	5	3	101.6705	6.7386	580	5	5	3	3	-1086.5400	14.0000
500	4	4	5	3	101.6228	6.7386	581	5	5	3	3	-1136.0100	14.0000
501	4	4	5	3	101.5751	6.7386	582	5	5	3	3	-1185.4800	14.0000
502	4	4	5	3	101.5274	6.7386	583	5	5	3	3	-1234.9500	14.0000
503	4	4	5	3	101.4797	6.7386	584	5	5	3	3	-1284.4200	14.0000
504	4	4	5	3	101.4320	6.7386	585	5	5	3	3	-1333.8900	14.0000
505	4	4	5	3	101.3843	6.7386	586	5	5	3	3	-1383.3600	14.0000
506	4	4	5	3	101.3366	6.7386	587	5	5	3	3	-1432.8300	14.0000
507	4	4	5	3	101.2889	6.7386	588	5	5	3	3	-1482.3000	14.0000
508	4	4	5	3	101.2412	6.7386	589	5	5	3	3	-1531.7700	14.0000
509	4	4	5	3	101.1935	6.7386	590	5	5	3	3	-1581.2400	14.0000
510	4	4	5	3	101.1458	6.7386	591	5	5	3	3	-1630.7100	14.0000
511	4	4	5	3	101.0981	6.7386	592	5	5	3	3	-1680.1800	14.0000
512	4	4	5	3	101.0504	6.7386	593	5	5	3	3	-1729.6500	14.0000
513	4	4	5	3	101.0027	6.7386	594	5	5	3	3	-1779.1200	14.0000
514	4	4	5	3	100.9550	6.7386	595	5	5	3	3	-1828.5900	14.0000
515	4	4	5	3	100.9073	6.7386	596	5	5	3	3	-1878.0600	14.0000
516	4	4	5	3	100.8596	6.7386	597	5	5	3	3	-1927.5300	14.0000
517	4	4	5	3	100.8119	6.7386	598	5	5	3	3	-1977.0000	14.0000
518	4	4	5	3	100.7642	6.7386	599	5	5	3	3	-2026.4700	14.0000
519	4	4	5	3	100.7165	6.7386	600	5	5	3	3	-2075.9400	14.0000
520	4	4	5	3	100.6688	6.7386	601	5	5	3	3	-2125.4100	14.0000
521	4	4	5	3	100.6211	6.7386	602	5	5	3	3	-2174.8800	14.0000
522	4	4	5	3	100.5734	6.7386	603	5	5	3	3	-2224.3500	14.0000
523	4	4	5	3	100.5257	6.7386	604	5	5	3	3	-2273.8200	14.0000
524	4	4	5	3	100.4780	6.7386	605	5	5	3	3	-2323.2900	14.0000
525	4	4	5	3	100.4303	6.7386	606	5	5	3	3	-2372.7600	14.0000
526	4	4	5	3	100.3826	6.7386	607	5	5	3	3	-2422.2300	14.0000
527	4	4	5	3	100.3349	6.7386	608	5	5	3	3	-2471.7000	14.0000
528	4	4	5	3	100.2872	6.7386	609	5	5	3	3	-2521.1700	14.0000
529	4	4	5	3	100.2395	6.7386	610	5	5	3	3	-2570.6400	14.0000
530	4	4	5	3	100.1918	6.7386	611	5	5	3	3	-2620.1100	14.0000
531	4	4	5	3	100.1441	6.7386	612	5	5	3	3	-2669.5800	14.0000
532	4	4	5	3	100.0964	6.7386	613	5	5	3	3	-2719.0500	14.0000
533	4	4	5	3	100.0487	6.7386	614	5	5	3	3	-2768.5200	14.0000
534	4	4	5	3	99.9999	6.7386	615	5	5	3	3	-2818.0000	14.0000
535	4	4	5	3	99.9522	6.7386	616	5	5	3	3	-2867.4700	14.0000
536	4	4	5	3	99.9045	6.7386	617	5	5	3	3	-2916.9400	14.0000
537	4	4	5	3	99.8568	6.7386	618	5	5	3	3	-2966.4100	14.0000
538	4	4	5	3	99.8091	6.7386	619	5	5	3	3	-3015.8800	14.0000
539	4	4	5	3	99.7614	6.7386	620	5	5	3	3	-3065.3500	14.0000
540	4	4	5	3	99.7137	6.7386	621	5	5	3	3	-3114.8200	14.0000
541	4	4	5	3	99.6660	6.7386	622	5	5	3	3	-3164.2900	14.0000
542	4	4	5	3	99.6183	6.7386	623	5	5	3	3	-3213.7600	14.0000
543	4	4	5	3	99.5706	6.7386	624	5	5	3	3	-3263.2300	14.0000
544	4	4	5	3	99.5229	6.7386	625	5	5	3	3	-3312.7000	14.0000
545	4	4	5	3	99.4752	6.7386							
546	4	4	5	3	99.4275	6.7386							
547	4	4	5	3	99.3798	6.7386							
548	4	4	5	3	99.3321	6.7386							
549	4	4	5	3	99.2844	6.7386							
550	4	4	5	3	99.2367	6.7386							
551	4	4	5	3	99.1890	6.7386							
552	4	4	5	3	99.1413	6.7386							

Nelilinkin liikkuvuus

FreeCAD-ohjelmalla piirretty malli nelilinkin liikkuvuudesta

